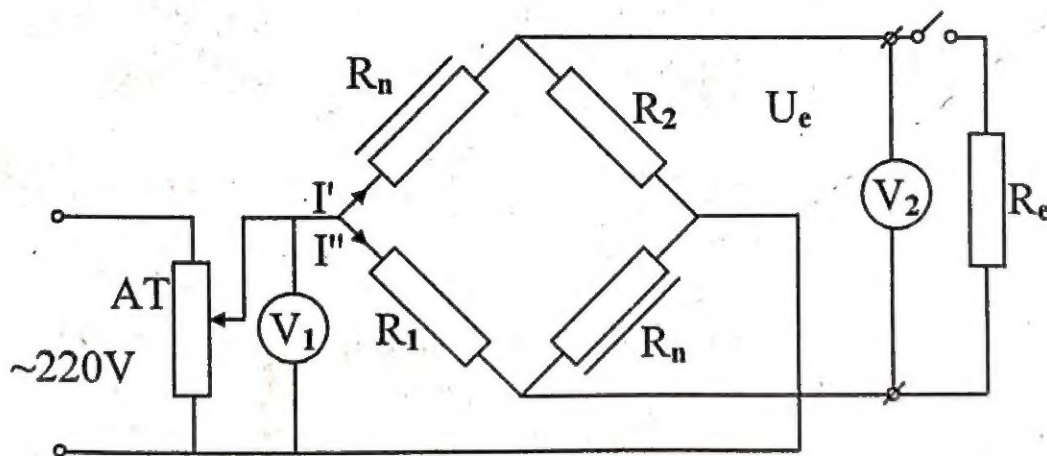


AURELIAN ȚÎRCĂ

CRISTINEL POPESCU

ELECTROTEHNICĂ

- ÎNDRUMAR DE LABORATOR -



EDITURA „ACADEMICA BRÂNCUȘI”

TÂRGU JIU, 2008

11397.019

Prefață

Laboratorul de Electrotehnică, destinat lucrărilor practice la disciplina Electrotehnică predată la Facultatea de Inginerie a universității „Constantin Brâncuși”, specializările: Automatică și Informatică Industrială, Energetică Industrială, Centrale Termoelectrice, Ingineria Mediului și Inginerie Economica este unul din laboratoarele catedrei de Energetică utilizat pentru efectuarea unor experimente cu studenții.

În cadrul laboratorului studenții se familiarizează cu fenomenele electrice legate de specialitatea lor, își formează deprinderi practice în vederea folosirii unor dispozitive și circuite electrice, învață să citească aparatele de măsură a mărimilor electrice, acumulând astfel cunoștințe privind studiul fenomenelor electromagnetice.

Îndrumarul de laborator cuprinde un număr de 17 lucrări ce se referă la studiul comportării unor circuite des întâlnite atât în curent continuu cât și în curent alternativ monofazat și trifazat.

În prima parte a îndrumarului se face o prezentare generală a laboratorului și a principalelor norme de protecția muncii.

În partea a doua se prezintă lucrările de laborator propriu-zise. La fiecare lucrare de laborator este prezentată o parte teoretică necesară pentru ca studenții să înțeleagă principiile și modul de lucru.

Lucrarea de față este un material foarte util în vederea pregătirii lucrărilor de laborator la disciplina ELECTROTEHNICĂ.

Autorii

INSTALAȚIA ELECTRICĂ A LABORATORULUI DE BAZELE ELECTROTEHNICII

Laboratorul de Bazele electrotehnicii este alimentat cu energie electrică de la tabloul general de distribuție al clădirii prin intermediul unui tablou de distribuție al laboratorului TDL, împărțit în două panouri.

De la TDL, prin cabluri energia electrică este distribuită în laborator la cele cinci tablouri terminale TT1, TT2, ... TT5.

De la tabloul TDL se obțin următoarele alimentări: alimentare trifazată (380/220V cu 4 conductoare), alimentare monofazată 220V c.a. și alimentare cu 220v c.c. (redresare cu diode).

Panoul TDL conține și circuite de comandă și semnalizare, de măsură a tensiunii.

Panoul TDL este prevăzut în partea superioară cu două voltmetre pentru măsurarea tensiunii electrice (pentru fiecare linie de tablouri terminale câte unul) și două comutatoare prin intermediul cărora se comută voltmetrele, două comutatoare pentru comutarea fiecărei linii de TT și lămpi pentru semnalizarea prezenței tensiunii la intrarea în tablourile terminale din laborator.

În fig.1 este prezentat aspectul exterior al TDL, iar în fig.2 aspectul exterior al unui tablou terminal.

Tabloul terminal este prevăzut în partea superioară cu lămpi de semnalizare, la mijloc cu priză de curent continuu, cheie comutatoare și priză de curent alternativ, iar în partea de jos cu borne.

Lămpile aprinse arată că bornele de ieșire se află sub tensiune. Trebuie precizat că întreaga construcție metalică a instalației are masă comună la pământ.

Instalația electrică a laboratorului este proiectată și executată astfel încât să funcționeze în condiții de maximă securitate.

Pentru buna desfășurare a lucrărilor practice în laborator, pentru utilizarea eficientă și disciplinată a timpului afectat lucrărilor și pentru asigurarea protecției proprii și a celor din jur ca și protecția aparaturii cu care se lucrează, studenții au următoarele obligații:

- să cunoască toate indicațiile generale din îndrumar, când intră la prima ședință de laborator;
- să-și pregătească în prealabil, cu ajutorul îndrumarului lucrarea ce urmează să o efectueze.

Înainte de începerea efectivă a lucrării, studentul este chestionat asupra conținutului lucrării. Necunoașterea părții teoretice atrage după sine neadmiterea studentului la ședința respectivă de lucrări.

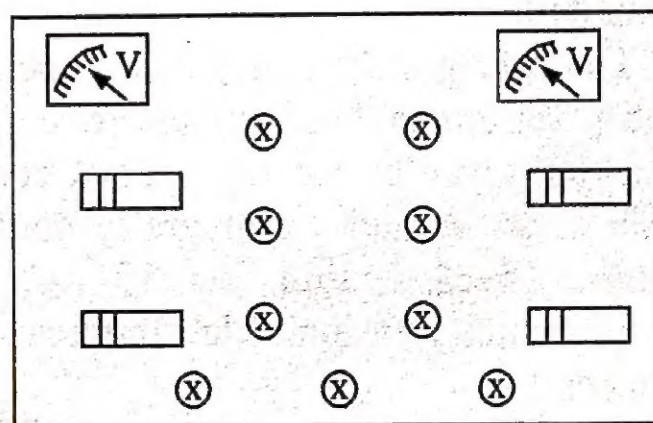


Fig.1. Vedere exterioară a tabloului de distribuție al tabloului (TDL).

La intrarea în laborator pentru o nouă lucrare, să prezinte un referat asupra lucrării precedente.

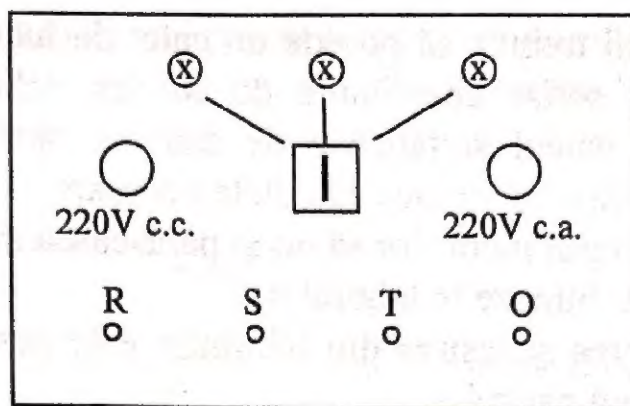


Fig.2. Vedere exterioară a unui tablou terminal

Referatul trebuie să conțină:

- titlul lucrării și chestiunile de studiat;
- schema de principiu și schema de lucru;
- lista detaliată a aparatelor utilizate;
- relațiile pentru calculul valorilor mărimilor măsurate;
- tabele și diagrame cu date experimentale și calculate;
- observații asupra lucrării.

Fără prezentarea referatului lucrării precedente, studentul nu va fi admis să efectueze lucrarea următoare.

Referatele prezentate se notează, cele necorespunzătoare atrag, după caz, refacerea lucrării și a referatului sau numai a referatului, notarea făcându-se în consecință:

- să observe starea pieselor și aparaturii pentru lucrare, sesizând personalului laboratorului eventualele nereguli sau defecte constatate;

- să execute lucrarea cu atenție maximă și cu respectarea normelor de protecție a muncii.

Sursele de alimentare se vor conecta numai după verificarea montajului de către conducătorul lucrării și numai în prezența acestuia.

Studentul răspunde pe toată durata lucrării, de starea pieselor și aparatelor folosite.

Este interzisă punerea schemelor de lucru sub tensiune fără verificarea și avizul conducătorului lucrării.

Studentul trebuie să posede un caiet de lucrări practice în care va avea scrise chestiunile de studiat, schema de lucru, formulele de calcul și tabelele de date în care își va înscrie rezultatele lucrării și va face calculele necesare.

- în timpul lucrărilor să nu-și părăsească masa de lucru;
- să nu fumeze în laborator;
- intrarea și ieșirea din laborator este permisă numai în timpul pauzelor.

Înteruperea alimentării cu energie electrică a schemei de lucru se face în prezența conducătorului lucrării și cu avizul acestuia, care verifică dacă s-au efectuat toate punctele prevăzute în lucrare și dacă schema de lucru a rămas în stare de funcționare normală.

APARATE ELECTRICE DE MĂSURĂ ȘI UTILIZAREA LOR

Instrumentele electrice de măsurat utilizate în laborator sunt construite și funcționează pe baza principiului forțelor ponderomotoare din câmpul electric și magnetic.

Ele sunt constituite dintr-un echipament fix și unul mobil. Echipamentul mobil se deplasează față de cel fix, deplasare ce poate fi urmărită prin deviația unui ac indicator de-a lungul unei scale gradate.

Între deplasarea unghiulară a echipamentului mobil și mărirea de măsurat x , există o relație de forma:

$$\alpha = f(x) \quad (1)$$

Forma funcției $f(x)$ indică dacă gradațiile scalei sunt uniforme sau neuniforme și dacă aceasta este gradată direct în unități ale mărimilor de măsurat.

Relația (1) se scrie sub forma:

$$x = k\alpha \quad (2)$$

unde k este constanta aparatului și este egală cu raportul dintre domeniul nominal de măsură al instrumentului x_n și numărul maxim de diviziuni la cap scală. Constanta k se determină cu următoarea relație:

$$k = \frac{x_n}{\alpha_{\max}} \quad (3)$$

Dacă se înlocuiește în relația (2) constanta aparatului k vom obține::

$$x = \frac{x_n}{\alpha_{\max}} \alpha \quad (4)$$

Exemplu:

Un ampermetru cu 10 diviziuni pe scală, folosit pe domeniul 100A, indică 6 diviziuni.

Deci:

$\alpha_{\max}=10$ diviziuni, $x_n=100$ A, $\alpha=6$ diviziuni.

$$k = \frac{x_n}{\alpha_{\max}} = \frac{100}{10} = 10 \left[\frac{A}{div} \right]$$

Valoarea curentului va fi:

$$I = k \cdot \alpha = 10 \cdot 6 = 60 \text{ A}$$

În tabelul nr.1 sunt date principalele sisteme de funcționare a dispozitivelor de măsurat, principiile lor de construcție și funcționare, simboluri, posibilitatea de lucru și utilizare curentă.









În afara simbolurilor prezente în tabelul nr.1 pe scala unui aparat electric de măsurat se mai găsesc anumite simboluri care precizează anumite proprietăți sau condiții de folosire ale aparatului și anume: destinația aparatului (specificată fie complet – voltmetru, wattmetru, ampermetru etc. fie prin simbolul unității de măsură respective – V, W, A etc.), clasa de precizie a aparatului, exprimată printr-un număr ce reprezintă eroarea maximă în procente din valoarea reală a mărimii măsurate, frecvența nominală, numărul de fabricație, etc.

Toate aceste simboluri sunt prezentate în tabelul nr.2

Tabel nr.1

3.SISTEMELE DE FUNCȚIONARE A DISPOZITIVELOR DE MĂSURAT

Sistemul	Principiu de construcție și funcționare	Simbol	Posibilități de lucru	
			Felul curentului	Domeniul de frecvență
Magneto-electric	Echipamentul mobil se deplasează ca rezultat al interacțiunii în câmp dintre un magnet permanent și una sau mai multe bobine parcurse de curent			
a) cu bobină mobilă	mMagnetul fix, bobina mobilă (tipul uzual)			/
	idem de mică inerție			0 - 50 ⁵ Hz
	magnetul fix bobinele încrucișate și mobile			/
a ₁) cu redresoare	se atașează tipului uzualredresoare uscate (diode semiconductoare)			0 - 2·10 ⁴ Hz
a ₂) cu termo-elemente	se atașează tipului uzual termelemente			0 - 50 MHz
b) cu magnet mobil	bobină fixă, magnetul mobil, de mică inerție			50 Hz
fero-magnetic	bobină (bobine) fixă parcursă de curent în câmpul căreia se deplasează o piesă (piese) feromagnetice mobilă			0 - 500 Hz

de vibrație	variantă a sistemului feromagnetic, de mică inerție cu lamele vibrante			20 - 500 Hz
electro-dinamic	bobine fixe și mobile parcurse de curenți, deplasarea fiind rezultatul interacțiunilor în câmpul magnetic			0 - 10 ³ Hz
de inducție	circuite inductoare fixe (electromagneți) acționează asupra curenților induși de ele în piese mobile conductoare și neferomagnet			50 Hz
electro-static	piese metalice, fixe și mobile, aflate la o d.d.p. în câmpul cărora apar forțe de interacțiune			0 - 10 ⁶ Hz

INDICAȚII CU PRIVIRE LA MANIPULAREA ȘI UTILIZAREA APARATELOR DE MĂSURĂ

Aparatele de măsură vor fi ferite de șocurile mecanice, pentru a se evita defectarea instrumentelor de măsură.

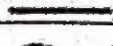
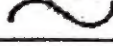


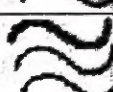
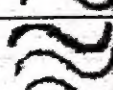
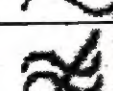






Ele se vor așeza în poziția normală de lucru indicată de către furnizorul echipamentului, pe cadranul instrumentului de măsură.

Înainte de conectarea în circuit se va selecta domeniul maxim de măsurare, iar după conectare domeniul va fi micșorat treptat până ce acul indicator va avea o deviație ce se recomandă a se găsi în ultima treime a scalei, pentru ca eroarea să fie minimă.

Aparatele de măsură se vor așeza pe masa de lucru în poziție orizontală (de regulă) pentru citiri precise și rapide.

Citirea se va face perpendicular pe scala aparatului, pentru eliminarea erorii de paralaxă.

Tabel nr.2

Semnificație	Simbol
a. Simboluri pentru tipul curentului	
Curent continuu	
Curent alternativ monofazat	
Curent continuu și curent alternativ monofazat	
Curent alternativ trifazat, pentru aparate cu un singur dispozitiv de măsurat	
Curent alternativ trifazat, pentru aparate cu două dispozitive de măsurat	
Curent alternativ trifazat, pentru aparate cu trei dispozitive de măsurat	
Curent alternativ trifazat, echilibrat	
b. Simboluri pentru tensiunea de încercare dielectrică	
Tensiunea de încercare 500 V	
Tensiunea de încercare peste 500 V (de ex. 2 kv)	
Nu se pretinde încercare dielectrică	
c. Simboluri pentru poziția normală de funcționare	
Cu cadranul vertical	
Cu cadranul orizontal	
Cu cadranul înclinat față de orizontală (de ex. 60°)	

ALEGEREA REOSTATELOR PENTRU REGLAREA CURENTULUI ȘI TENSIUNII

În montajele în care se fac măsurătorile trebuie să existe posibilitatea reglării curenților și tensiunilor, fie pentru a modifica condițiile de măsurare, fie pentru a situa indicațiile

instrumentelor de măsură a aparatelor spre sfârșitul scalelor astfel încât să se obțină erori relative de citire cât mai mici. O asemenea reglare trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- reglarea să fie cât mai liniară și mai lină;
- pierderile de putere în elementul de reglare să fie cât mai mici.

Pentru reglare se folosesc în mod curent fie reostate, fie în cazul curentului alternativ diferite mijloace electromagnetice (autotransformatoare reglabile, reglatoare de inducție).

Reglarea curentului

Pentru reglarea curentului continuu sau alternativ în schemele electrice aferente lucrărilor de laborator, se utilizează, de obicei, reostatele metalice cu cursor, alcătuite din conductor metalic de *constantan* (*manganină*) înfășurat pe unul sau doi cilindri izolați de ceramică. Cursorul este accesibil la o bornă separată, uneori arcată pentru a se deosebi de celelalte borne ce reprezintă capetele înfășurării.

Când se folosește reostatul cu un singur cilindru, el se conectează în circuit ca în fig.3 în care R_h s-a notat rezistența totală a reostatului, iar cu R rezistența consumatorului.

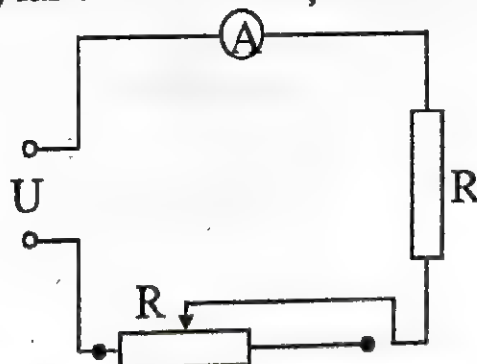


Fig.3 Schema de reglare a curentului și tensiunii

Dacă se folosește reostatul pentru reglajul de curent, este necesar ca la închiderea comutatorului, reostatul să se găsească pe poziția rezistenței maxime, deci curent inițial minim în circuit.

Când se utilizează un reostat cu doi cilindri condiția de mai sus rămâne valabilă și se adoptă una din schemele de mai jos.

În schema electrică prezentată în fig.4 se utilizează o rezistență reglabilă prin intermediul a doi cilindri în serie, iar în fig.5 se utilizează rezistența reglabilă a doi cilindri în derivație (paralel). Reglarea reostatului se face în funcție de intensitatea curentului din circuit care nu trebuie să depășească curentul maxim admis înscris pe plăcuța reostatului, de către furnizorul echipamentului.

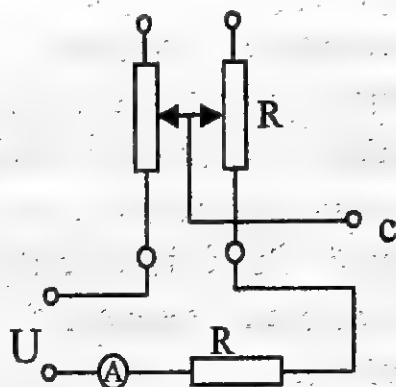


Fig.4 Schema de principiu a unei rezistențe reglabile a doi cilindri în serie

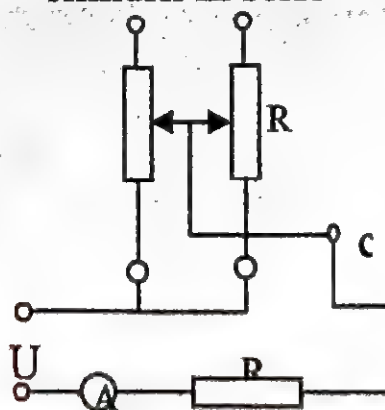


Fig.5 Schema de principiu a unei rezistențe reglabile a doi cilindri în derivație

Reglarea tensiunii

Pentru alimentarea unui receptor cu tensiune continuă sau alternativă variabilă, mai mică decât tensiunea sursei, reostatele se folosesc în montaj potențiometric (fig.6, fig.7, fig.8).

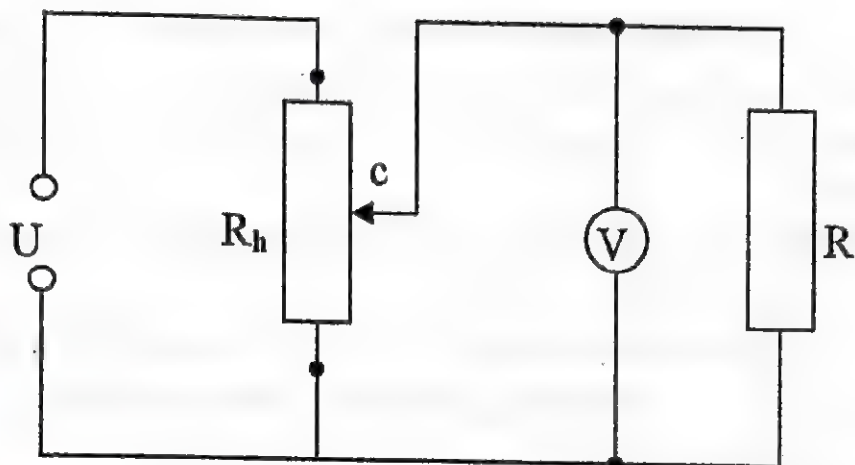


Fig.6 Schema de principiu a unui reostat simplu în montaj potențimetric

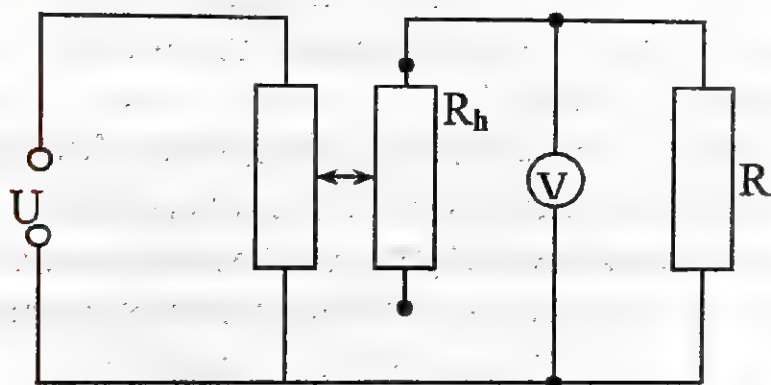


Fig.7 Schema de principiu a unui reostat dublu în montaj potențimetric

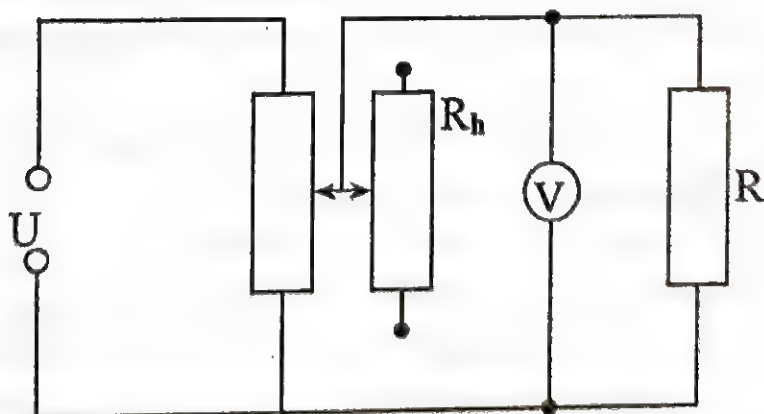


Fig.8 Schema de principiu a unui reostat dublu cu ambii cilindrii conectați

La montajul potențiometric, se impune, ca înainte de conectarea schemei de lucru la sursa de tensiune, cursorul reostatului să se găsească pe poziția tensiunii minime, aplicate reostatului.

După conectare, tensiunea se va regla la valoarea necesară.

NOȚIUNI PRIVIND TEHNICA SECURITĂȚII ÎN INSTALAȚIILE ELECTRICE

Deoarece în instalațiile electrice pericolul de accidentare nu este semnalat prin simțuri, trebuie luate măsuri de prevenire.

Practica a arătat că cel mai mare număr de accidente provocate de curentul electric au loc în instalațiile electrice de joasă tensiune ($U_n < 1000$ V).

Cauzele principale sunt nerespectarea instrucțiunilor de tehnica securității la instalațiile de joasă tensiune.

Electrocutarea este efectul patologic al trecerii curentului electric prin organismul viu. Electrocutarea se produce sub două forme:

- electrotraumatism;
- șoc electric.

Cel mai periculos electrotraumatism este arsura. Corpul omenesc constituie o rezistență electrică datorită în principal pielei și anume epidermei, din acest motiv arsurile sunt de obicei superficiale.

În anumite cazuri, arsurile pot fi interne și atunci sunt foarte grave de obicei mortale.

Șocul electric este cel mai frecvent și primejdios accident și se datorează acțiunii curentului electric asupra sistemului nervos și asupra organelor interne (inimă, plămâni, etc). Comportarea corpului omenesc la acțiunea curentului electric diferă de la individ la individ și ea depinde de:

- starea pielii și locul de contact;
- suprafața și presiunea de contact;

- mărimea, felul și durata curentului;
- mărimea tensiunii;
- mărimea frecvenței.

Rezistența pe care o opune corpul omenesc trecerii curentului electric depinde de starea pielii. Dacă aceasta este uscată și intactă, rezistența ajunge până la $100\text{ K}\Omega$, dacă este umedă, rezistența scade ajungând până la câteva sute de ohmi.

La trecerea curentului electric prin corpul omenesc, o mare importanță o are calea străbătută de curent. Dacă acesta se închide prin inimă sau creier este mult mai periculos decât cel care se închide pe alte căi.

Rezistența corpului omenesc este mai mică dacă suprafața și presiunea de contact sunt mai mari.

Curentul alternativ de 10 mA și curentul continuu de 50 mA se consideră nepericulos.

Rezultă că rezistența organismului omenesc este mai mare la curentul continuu decât la curentul alternativ.

Durata curentului asupra corpului omenesc are următoarea influență timp de aproximativ $0,1\text{ sec}$, între o contractare și o dilatare, inima se găsește într-o stare de relaxare în timpul căreia ea este deosebit de sensibilă la acțiunea curentului electric.

În stratul superficial al pielii, are loc fenomenul de străpungere atunci când se aplică tensiuni mari, rezistența acestui strat scade brusc și crește intensitatea curentului, care distruge țesuturile prin efecte termice.

S-au stabilit ca tensiuni nepericuloase 40 V c.c. și 12 V c.a. În curent alternativ, rezistența opusă de organism trecerii curentului electric scade cu creșterea frecvenței.

Frecvența industrială de 50 Hz este foarte periculoasă pentru om.

Din cele prezentate mai sus, rezultă următoarele măsuri de protecție personală în laboratorul de BAZELE ELECTROTEHNICII:

- să nu se atingă părțile metalice aflate sub tensiune;

- este interzisă executarea schemelor de lucru aferente lucrărilor de laborator cu mâinile umede;
- se va lega obligatoriu la pământ părțile metalice situate în vecinătatea căilor de curent acolo unde sunt prevăzute;
- se vor strânge bine piulițele bornelor de legătură la executarea schemelor de lucru, pentru a se evita desfacerea lor în timpul desfășurării lucrării și deci atingerea lor accidentală;
- este interzisă acționarea cheilor de comandă ce acționează tablourile de distribuție ce alimentează cu tensiune electrică schemele de lucru aferente lucrărilor de laborator
- studenții trebuie să aibă o ținută adecvată lucrului în laborator cu specific electrotehnic (hainele, halatele strânse pe corp).

STUDIUL CIRCUITELOR CU ELEMENTE NELINIARE

1. Chestiuni teoretice

În cadrul acestei lucrări se studiază comportarea elementelor neliniare rezistive a căror caracteristică tensiune-curent $U=f(I)$ este neliniară. Pentru a putea caracteriza rezistoarele neliniare se utilizează următoarele caracteristici și parametri:

a. *Caracteristica tensiune* $U=f(I)$ numită și caracteristică voltampermetrică, care arată dependența între tensiunea la bornele elementului neliniar și curentul care trece prin el, fig.1.

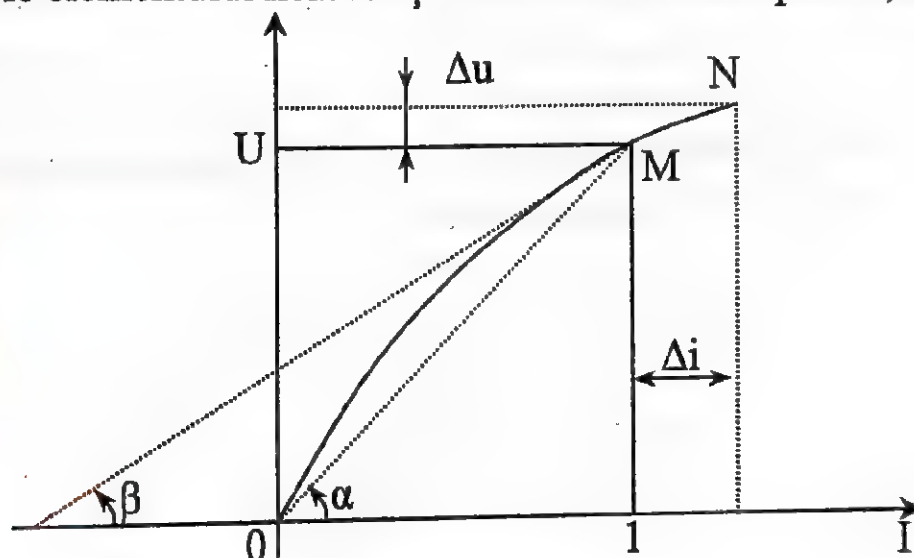


Fig.1 Caracteristica tensiune - curent

b. *Rezistența statică* într-un punct de funcționare M se determină cu următoarea expresie:

$$R_{st} = U/I = k \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

unde:

k este raportul între scările grafice ale tensiunii (V/mm) și curentului (A/mm).

c. *Rezistența dinamică* într-un punct de funcționare M se determină cu următoarea relație:

$$R_d = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{dU}{dI} = \text{ktg}\beta \quad (2)$$

Pentru calculul circuitelor neliniare de curent continuu se utilizează teoremele lui Kirchhoff:

$$\sum_{k \in (b)} I_k = 0 \quad (\text{pentru fiecare nod } b=1, 2, 3, \dots, N-1)$$

$$\sum_{k \in (p)} E_k = U_k \quad (\text{pentru fiecare ochi } p=1, 2, 3, \dots, 0) \quad (3)$$

împreună cu caracteristicile tensiune-curent ale elementelor neliniare $U_k=f(I_k)=U_k(I_k)$.

Stabilizarea tensiunii cu ajutorul elementelor neliniare, se bazează pe situarea punctului de funcționare într-o astfel de poziție, încât la o variație mare a curentului prin elementul neliniar să corespundă o variație mică a tensiunii la bornele acestuia (fig.2). Un stabilizator de tensiune cu un grad mai mare de stabilizare este cel în punte (fig.3)

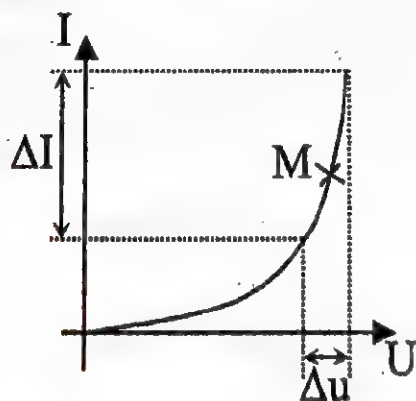


Fig. 2 variația tensiunii la bornele elementelor neliniare de circuit

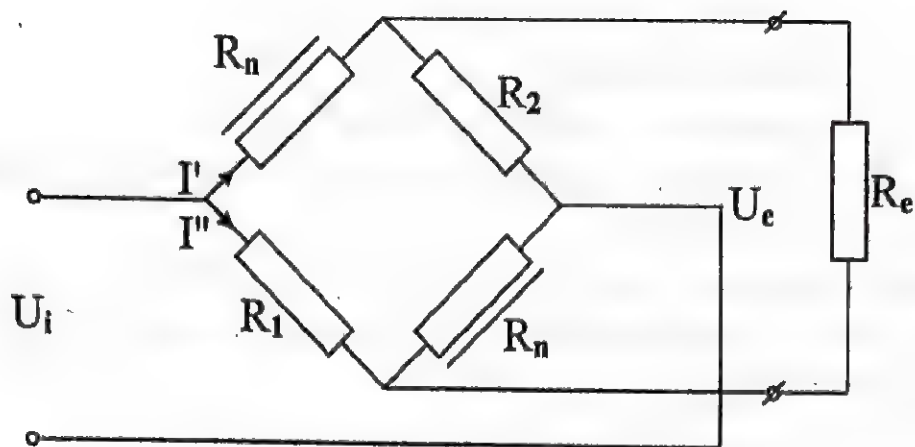


Fig. 3 Schema de principiu a unui stabilizator de tensiune

Dacă se aleg rezistențele liniare ale punții $R_1=R_2=R_d$, în care R_d este rezistența dinamică a elementelor neliniare pe porțiunea liniară caracteristicii, se determină tensiunea la ieșirea U_e , practic constantă (fig.4) utilizând următoarea relație:

$$U_e = \frac{R_s}{R_s + R_d} E_0 \quad [V] \quad (4)$$

unde:

R_d – rezistență dinamică

R_s – rezistența de sarcină

E_0 - tensiunea electromotoare ce intervine la liniarizarea caracteristicii elementului neliniar.

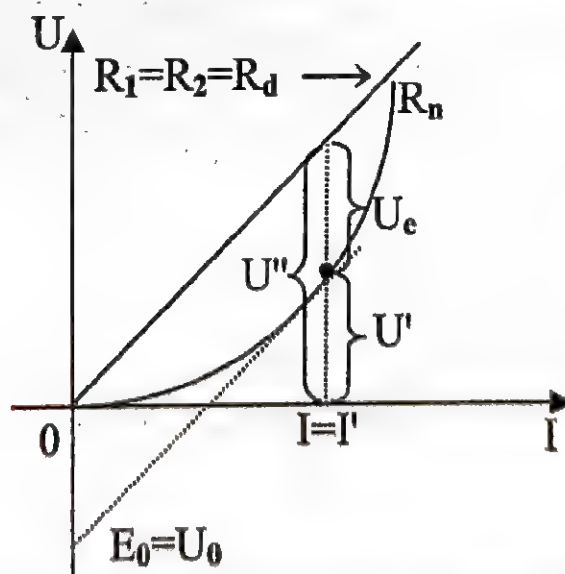


Fig.4 Caracteristica de variație tensiune-curent a stabilizatorului de tensiune

2. Chestiuni de studiat

2.1. Elemente neliniare legate în serie

a. Ridicarea caracteristicii tensiune – curent pentru fiecare din elementele înseriate.

b. Determinarea grafi – analitică a caracteristicii tensiune – curent pentru dipolul format prin legarea în serie a celor două elemente neliniare.

2.2. Studiul stabilizatorului de tensiune în punte

a. Determinarea experimentală a caracteristicii $U_c = f(U_i)$ pentru următoarele cazuri:

$$R_1 = R_2 > R_d;$$

$$R_1 = R_2 = R_d;$$

$$R_1 = R_2 < R_d$$

La mersul în gol și în sarcină a stabilizatorului.

b. Determinarea grafo-analitică a acestor curbe și compara-rea lor cu cele experimentale.

c. Verificarea valorii tensiunii stabilizate cu formula (4)

3. Scheme experimentale și aparate de măsură utilizate:

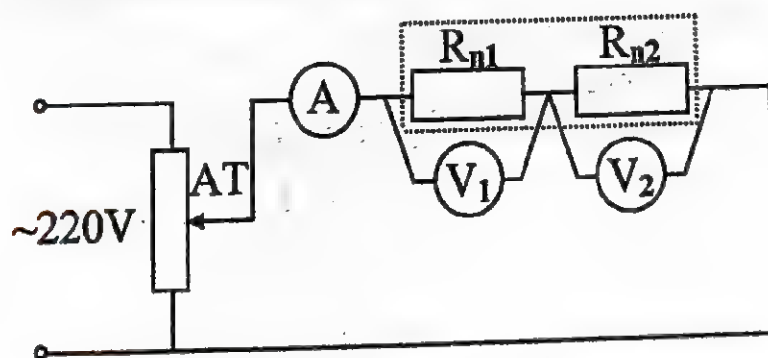


Fig. 5 Schema de lucru a două elemente neliniare de circuit conectate în serie

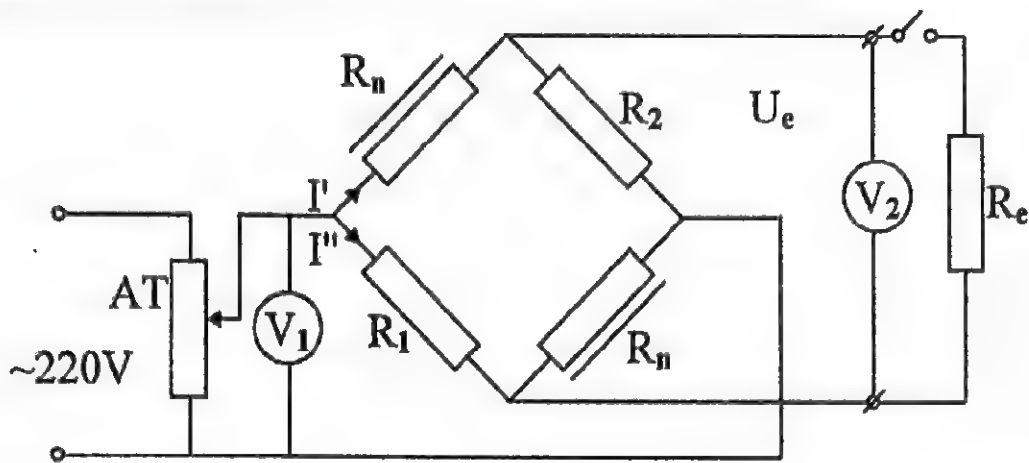


Fig. 6 Schema de lucru a unei punți realizată din elemente neliniare de circuit

Elementele componente ale celor două scheme sunt:

AT – autotransformator

c – montaj cu două lămpi cu incandescență, una de 40 W și cealaltă de 100 W, 220 V, legate în serie.

A- miliampermetru (MAVO-35, UNITRA)

V_1, V_2 – MAVO 35

R_s – reostat 580 Ω ; 0,4 A

k – întrerupător monopolar

R_1, R_2 – reostate de 100 Ω , 2,45 A.

4. Modul de lucru

A. Se execută montajul din fig.5. După conectarea la tensiunea de 220 V curent alternativ, se variază tensiunea de intrare cu ajutorul autotransformatorului de la 0 la valoarea maximă. Se citesc curentul absorbit și căderile de tensiune pentru fiecare lampă. Rezultatele se notează în tabelul nr.1.

B. Se execută montajul din fig.6, reostatele R_1, R_2 având cursorul între marcajele cu vopsea pentru a asigura o rezistență egală cu $R_d=800\Omega$.

Se crește treptat tensiunea de intrare aplicată punții citindu-se indicațiile la aparate pentru k deschis și k deschis. Se repetă operația pentru R_1, R_2 reglate la valori mai mari și apoi

mai mici ca R_d (reglaj executat cu ajutorul cursorului). Notăm valorile citite în tabelul nr.2.

5. Tabele de date. Interpretarea rezultatelor.

Tabel nr.1

Nr.crt	I [mA]	U_1 [V]	U_2 [V]
1			
2			
3			
4			
5			
6			

A. Se vor trasa grafic curbele $U_1=f(I)$ și $U_2=f(I)$.

Se determină grafo-analitic $U=U_1(I)+U_2(I)=f(I)$.

B. Se trasează, grafic caracteristicile $U_e=f(U_i)$, pentru fiecare caz în parte, cu k închis și k deschis.

Cunoscând de la punctul A caracteristica $U_2=f(I)$ și valorile $R_1=R_2=R_d=800\Omega$, se determină grafo-analitic curbele de mai sus și se reprezintă grafic.

Tabel nr.2

	k-deschis		k-închis	
	U_i [V]	U_e [V]	U_i [V]	U_e [V]
$R_1=R_2=R_d$				
$R_1=R_2>R_d$				
$R_1=R_2<R_d$				

STUDIUL REGIMULUI TRANZITORIU ÎN CIRCUITELE LINIARE

1. Chestiuni teoretice

1.1. La conectarea sau deconectarea surselor de alimentare sau orice schimbare a parametrilor R, L, C se produc, în circuitele electrice, procese tranzitorii (trecătoare). Aceste procese corespund unor regimuri tranzitorii, care fac trecerea de la starea inițială a circuitului la o stare de regim permanent în care curenții variază după aceeași lege ca și tensiunea aplicată la borne. De exemplu, stabilitatea curentului continuu într-o bobină, sub acțiunea unei tensiuni constante aplicate la bornele circuitului, nu se face instantaneu, ci, în circuit, se stabilește un regim tranzitoriu în care intensitatea curentului crește de la valoarea inițială la valoarea constantă de regim permanent.

Metoda generală de studiu a regimului tranzitoriu constă în scrierea ecuațiilor integro-diferențiale ale circuitului și rezolvarea lor. Constantele de integrare ale soluției generale a ecuației diferențiale se determină în funcție de condițiile inițiale. Numărul de constante este egal cu ordinul de bobine și condensatoare existente în circuit.

1.2. Conectarea unui rezistor în serie cu un condensator la o sursă de tensiune continuă (fig.1)

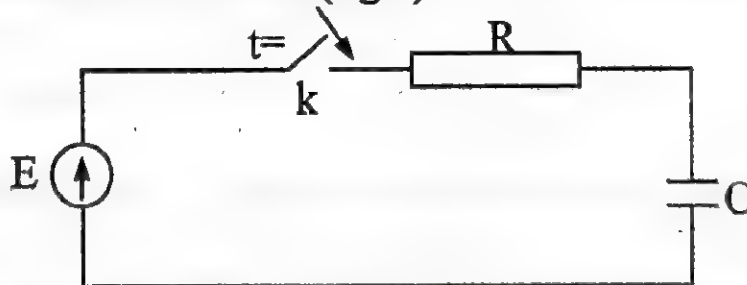


Fig. 1 Schema de principiu a unui circuit serie R, C

După închiderea întrerupătorului, conform teoremei a doua a lui Kirchhoff rezultă:

$$E_0 = R_i + U_c \quad (1)$$

Dacă se ține seama că $i = C \frac{dU_c}{dt}$ se obține ecuația diferențială

$$RC \frac{dU_c}{dt} + U_c = E_0 \quad (2)$$

Soluția generală a acestei ecuații este:

$$U_c = K e^{-\frac{t}{RC}} + E_0 \quad (3)$$

iar soluția particulară $U_{ep} = E_0$.

Constanta de integrare K se determină din condiția inițială:

$$U_c(0) = U_0 \Rightarrow K = U_0 - E_0$$

Tensiunea la bornele condensatorului este:

$$U_c = E_0 (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) + U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4)$$

unde $RC = \tau$ (constantă de timp).

Curentul de încărcare are expresia:

$$i = C \frac{dU_c}{dt} = \frac{E_0 - U_0}{e} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (5)$$

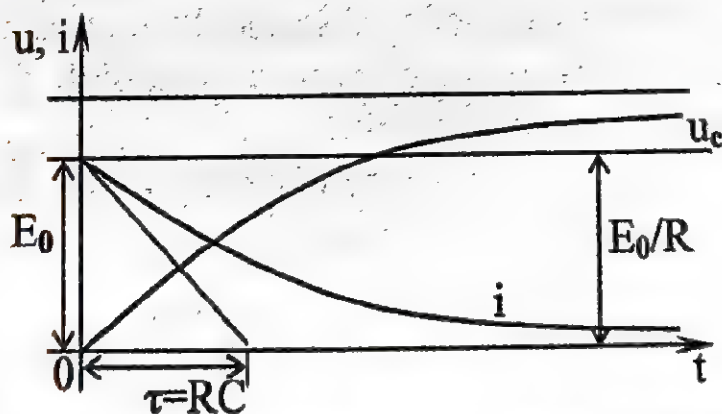


Fig.2 Caracteristicile de variație $u=f(t)$ și $i=f(t)$

În fig. 2 sunt reprezentate variațiile în timp ale mărimilor $U_c(t)$ și $i(t)$.

1.3. Regimul tranzitoriu la descărcarea unui condensator.

Ecuția diferențială a circuitului se obține din relația (1) pentru $E_0 = 0$. Tensiunea la bornele condensatorului este:

$$U_c = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (6)$$

iar curentul de descărcare:

$$i = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (7)$$

1.4. Conectarea circuitului serie R, L, C la o tensiune constantă (fig.3)

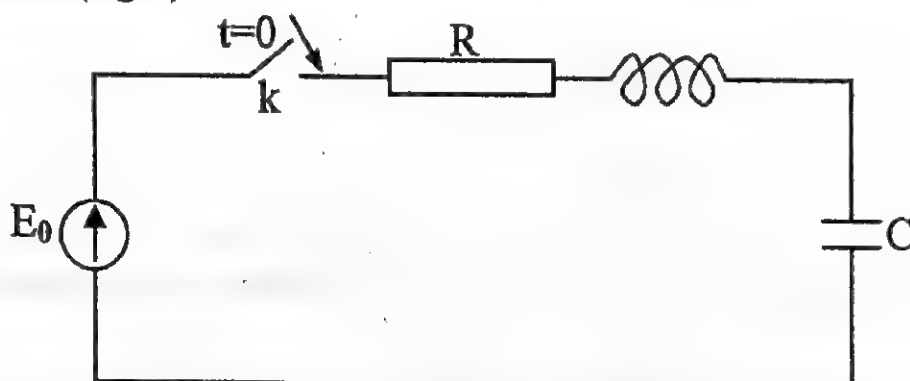


Fig.3 Schema de principiu a unui circuit R, L, C serie

Ecuția diferențială a acestui circuit este:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = E_0 \quad (8)$$

Prin derivare se obține:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = 0 \quad (9)$$

la care soluția este aperiodică, când rădăcinile ecuației caracteristice sunt reale și oscilantă amortizat, când rădăcinile sunt complexe.

2. Chestiuni de studiat

2.1. Conectarea unor condensatoare diferite în serie cu un rezistor la o sursă de tensiune continuă.

2.2. Descărcarea unor condensatoare pe un rezistor.

2.3. Descărcarea unui condensator inițial încărcat cu un rezistor la o sursă de tensiune continuă.

2.4. Circuit R, L, C în regim tranzitoriu, pentru $R < R_{cr}$, $R = R_{cr}$

3. Scheme experimentale și aparate de măsură utilizate

Această schemă se utilizează la toate cele trei puncte.

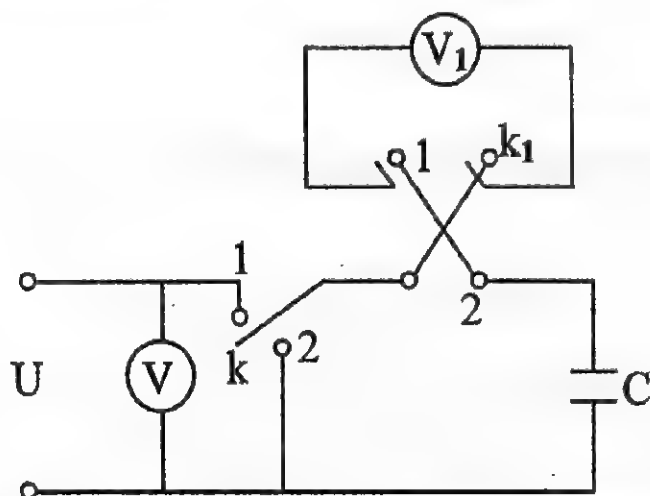


Fig.4 Schema de lucru a unui condensator în regim tranzitoriu

- U – sursă de tensiune continuă 300 V
- V – voltmetru curent continuu 300 V
- V₁ – MAVO 35
- k – comutator monopolar cu două poziții
- C – condensator 4μF, (8μF)

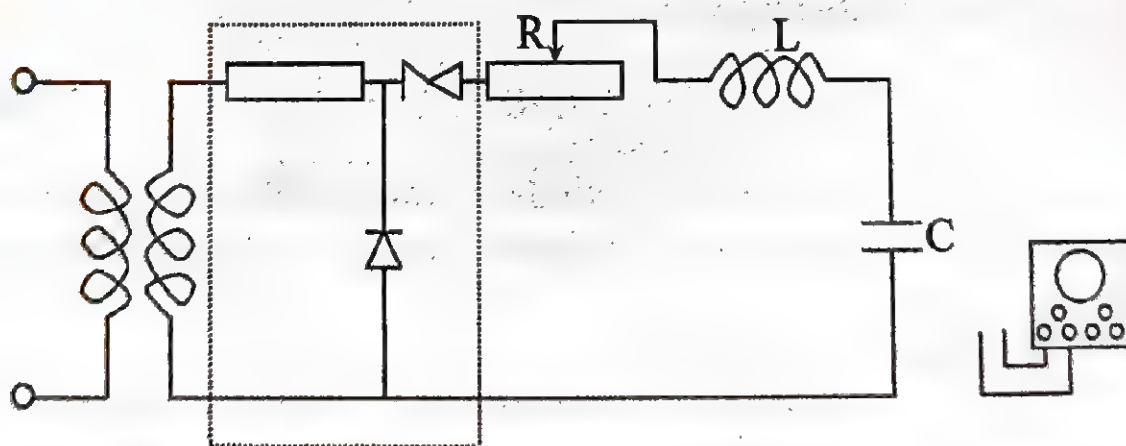


Fig.5 Schema de lucru a unui circuit R, L, C serie în regim tranzitoriu

- G.I.T. – generator de impulsuri trapezoidale
- R – potențiomtru bobinat 1KΩ
- L – baterie de condensatoare (1.5, 1, 3μF)

4. Modul de lucru

4.1. Se execută montajul din fig.4. La începutul lucrării comutatorul k se pune pe poziția 2 pentru ca acul indicator al voltmetrului V_1 să nu se deplaseze în sens invers.

Se schimbă k_1 pentru scurt timp pe poziția 1. Dacă acul indicator al voltmetrului V_1 deviază în sens invers se modifică poziția comutatorului k_1 .

Înainte de fiecare încărcare, comutatorul k fiind pe poziția 2, se scurtcircuitază condensatorul C sau voltmetru, pentru a se plasa condensatorul în condiții inițiale de zero.

Se comută k de pe poziția 2 pe poziția 1, la trecerea prin $t=0$ a unui ceas cronometru sau ceas cu secundar central. Se citește indicația voltmetrului V_1 la intervale de 10-15 secunde.

Nu se va schimba scala voltmetrului în timpul citirii, pentru a nu modifica rezistența serie de încărcare, care este chiar voltmetrul. Se fac citiri pentru $C=4\mu F$ și $C=8\mu F$.

Se trasează curbele $i=f(t)$, unde $i = \frac{U_{v1}}{R_{v1}}$, U_{v1} fiind indicația voltmetrului, iar R_{v1} rezistența internă a acestuia.

4.2. Pentru punctul 2.2 la momentul $t=0$, se trece comutatorul k de pe poziția 1 pe poziția 2, simultan cu comutarea lui k_1 , condensatorul C fiind încărcat.

Tensiunea inițială, al $t=0$ se consideră aceea citită la voltmetrul V cu o fracțiune de timp înainte de comutarea lui k .

În acest mod, condensatorul se descarcă pe rezistența voltmetrului. Se procedează ca la 4.1 și se citesc indicațiile voltmetrului V_1 la diferite momente trasându-se curba $U_{v1}=f(t)$.

4.3. Pentru punctul 2.3, se procedează ca la 4.1, cu deosebirea că se pornește la $t=0$ de la o tensiune inițială oarecare a condensatorului C , citită pe voltmetrul V_1 . La comutarea lui k se comută simultan și k_1 . Se trasează curba $i_{v1}=f(t)$, ca și la punctul 4.1.

4.4. Caracterul acestui experiment este calitativ.

Se conectează bornele osciloscopului la bornele condensatorului.

După conectarea schemei din fig.5, se mărește amplificarea osciloscopului, până când imaginea de pe ecran are amplitudinea corespunzătoare.

Rolul G.I.T. este de a da impulsuri sinusoidale.

Se reproduce pe caiete imaginea corespunzătoare diferitelor valori ale rezistenței R . Valoarea rezistenței R pentru care încep să apară oscilații (rezistența critică) se măsoară cu un Ohmetru. Se repetă măsurătorile și pentru alte valori ale capacității condensatorului C .

5. Tabele de date și rezultate

Pentru cele trei puncte se trec datele ridicate experimental în tabele de forma următoare:

Tabelul 1

Nr.crt	$t[s]$	$U[V]$	$i[A]$	Observații
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				
7.				

Lucrarea nr.3

STUDIUL UNEI REȚELE DE CURENT CONTINUU

1. Chestiuni teoretice

Într-o rețea liniară de curent continuu se vor verifica: prima teoremă a lui Kirchhoff, teorema superpoziției, teorema generatorului echivalent de tensiune (Thevenin), teorema generatorului echivalent de curent (Norton) și teorema transferului maxim de putere.

Se consideră rețeaua liniară de curent continuu din fig. 1 având $L=3$ laturi, $N=2$ noduri și $O=2$ ochiuri fundamentale. Două dintre laturi sunt active și au rezistența fixă, iar a treia latură este pasivă și rezistența ei poate fi variată.

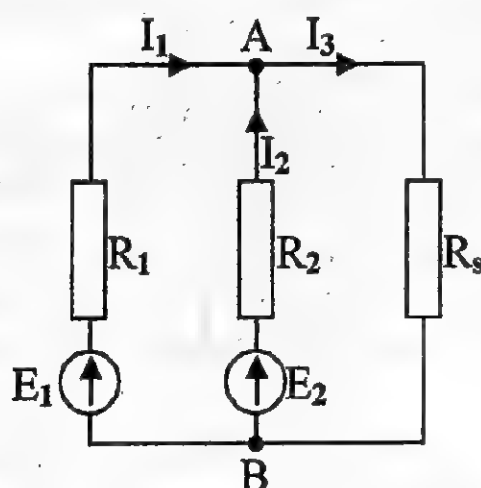


Fig.1 Schema de principiu a unei rețele liniare de curent continuu

Cu notațiile din fig.1 se verifică următoarele relații:
 $I_1 + I_2 - I_3 = 0$; teorema I a lui Kirchhoff în nodul A.

$I_k = I'_k + I''_k$ ($k=1,2,3$); teorema superpoziției în laturile extreme;

$I_3 = \frac{U_{AB_0}}{R_{AB} + R_3}$; teorema generatorului echivalent de tensiune

(Thevenin) în latura 3.

$$U_{AB} = \frac{I_{sc_{AB}}}{G_{AB} + G_3};$$
 teorema generatorului echivalent de curent (Norton) în latura 3.

$$P_{max} = F_{(R_{AB}-R_i)} = \frac{U_{AB_0}^2}{4 \cdot R_{AB}};$$
 teorema transferului maxim de putere.

2. Chestiuni de studiat

a) Se vor verifica: teorema I-a a lui Kirchhoff și teorema superpoziției;

b) Se vor verifica: teorema generatorului echivalent de tensiune (Thevenin) și teorema generatorului echivalent de curent (Norton);

c) Se va verifica teorema transferului maxim de putere.

3. Scheme experimentale și aparate de măsură utilizate

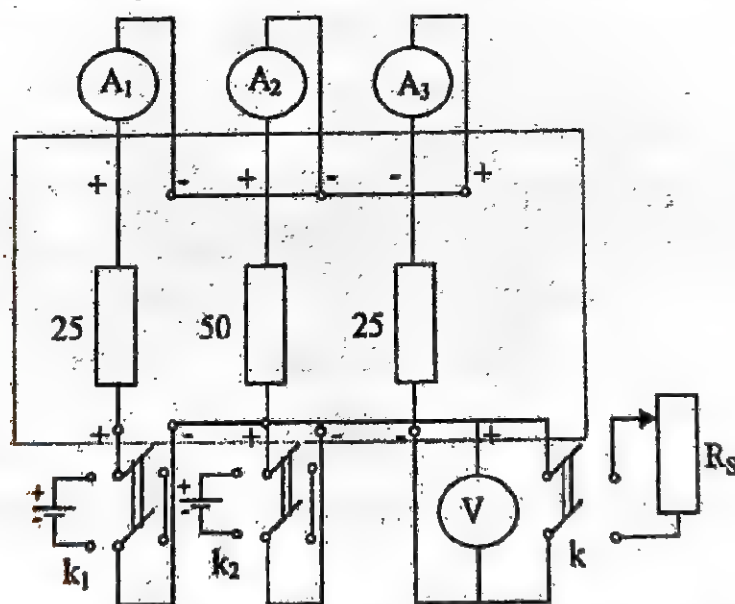


Fig. 2 Schema de lucru a unei rețele de curent continuu

Partea din montaj încadrată cu linie întreruptă este realizată pe o placă cu borne de acces.

E_1, E_2 – surse de curent continuu stabilizate, de tensiuni diferite între 6 și 12 V

K_1, K_2 – comutatoare bipolare

K – întrerupător bipolar

A_1, A_2, A_3 – MAVO 35 sau UNITRA

V – MAVO 35

R_s – reostat de sarcină

4. Modul de lucru

Se conectează la rețeaua studiată ambele surse și reostatul de sarcină R_s (fig.2). Se reglează apoi rezistența reostatului R_s astfel încât intensitatea curentului I_3 , să fie cuprinsă între 50 și 150 mA. La primele două puncte studiate se va lucra cu aceeași valoare a rezistenței de sarcină, deci nu se va modifica poziția cursorului.

a. Pentru verificarea teoremei superpoziției se introduc la început ambele surse în circuit (cu ajutorul comutatoarelor k_1 și k_2), respectând polaritățile aparatelor indicate în schema de montaj. Sensurile efective ale curenților din laturile 1, 2, 3 coincid în acest caz cu sensurile de referință din fig. 1 și toți curenții au semnul pozitiv. Se pasivizează apoi pe rând câte o latură (trecând câte un comutator k_1 sau k_2 în poziția de scurtcircuit), după ce în prealabil s-a schimbat polaritatea ampermetrului din latura ce se pasivizează, curentului respectiv i se va atribui semnul negativ. Când se reintroduce sursa în latură, se va reveni la montajul inițial (cu polaritățile din schema de montaj).

Cu datele înscrise în tabelul 1 se verifică pe linii teoremele I ale lui Kirchhoff și pe coloane teorema superpoziției.

b. Pentru verificarea teoremelor generatorului echivalent, se măsoară cu voltmetrul V tensiunea U_{AB0} , când circuitul reostatului R_s este întrerupt, adică la mersul în gol; se scurtcircuită apoi reostatul R_s și se măsoară curentul de scurtcircuit I_{scAB} al bornelor (cu ampermetrul A_3). Cu ajutorul tabelului 2 se verifică teoremele generatoarelor echivalente de tensiune și de curent pentru circuitul accesibil prin bornele A și B.

Pentru linia 1 a tabelului 2, tensiunea U_{AB} la bornele reostatului R_s și curentul I_3 din latura 2, au valorile citite la

punctul 1 și se iau din prima linie a tabelului 1. În linia 2 se vor trece valori măsurate pentru o tensiune la borne $U_{AB}=1.5-2V$.

c. Pentru verificarea teoremei transferului maxim de putere, rețeaua funcționează cu ambele surse conectate și cu reostatul de sarcină R_s introdus în latura 3.

Cu ajutorul reostatului de sarcină R_s se realizează trei regimuri de funcționare: regim de transfer maxim de putere, când $R_s=R_{AB}$, (calculat la punctul 2), și două regimuri când R_s are valori diferite de R_{AB} , una de 2 – 3 ori mai mică și una de 2 – 3 ori mai mare ca R_{AB} .

Cu aceste date se completează și tabelul 3 și se verifică teorema transferului maxim de putere.

5. Tabele de date și rezultate

$E_1=....V$ $E_2=....V$

Tabelul 1

Nr crt	Sursa		I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	U_{AB} [V]	Verificarea Teoremei I a lui Kirchhoff
	1	2					
1.	E_1	E_2					
2.	E_1	0					
3.	0	E_2					
4.	Verificarea Teoremei Superpoziției						

Tabelul 2

Valori măsurate					Rezultate (calculate)			
Nr. crt	U_{ab} (V)	I_s (A)	U_{AB0} (V)	I_{sAB} (A)	$R_{AB} = U_{AB0}/I_{sAB}$	$R_{AB} = U_{AB}/I_3$	$I_3 = U_{AB0}/R_{AB} + R_s$	$U_{AB} = I_{sAB}/G_{AB} + G_s$
1.								
2.								

$$E_1 = \dots V$$

$$E_2 = \dots V$$

$$R_{AB} = \dots \Omega$$

Tabelul 3

Nr. crt	R_s	Valori măsurate				Rezultate (calculate)	
		I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	U_{AB} [V]	$P_s = E_1 I_1 + E_2 I_2$	$P_s = U_{AB} I_2$
1.	$R_s = R_{AB}$						
2.	$R_s = 1/2 R_{AB}$						
3.	$R_s = 2 R_{AB}$						

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A REZISTENȚEI ELECTRICE UTILIZÂND LEGEA LUI OHM

1. CHESTIUNI TEORETICE

În cadrul acestei lucrări se determină pe cale experimentală rezistența electrică utilizând legea lui Ohm:

$$I = U/R; U = RI \quad (1)$$

Legea lui Ohm se referă la materiale liniare din punctul de vedere al conductei electrice (metalele).

Există și materiale pentru care rezistența depinde de valoarea tensiunii (rezistențe neliniare).

Rezistența electrică a unei porțiuni de conductor filiform este totdeauna pozitivă și are următoarea expresie:

$$R = \rho l/S.$$

unde:

ρ – rezistivitate [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]

l – lungimea conductorului [m]

S – secțiunea conductorului [mm^2]

2. CHESTIUNI DE STUDIAT

a) Determinarea pe cale experimentală a rezistenței electrice a unui rezistor pentru diferite valori ale tensiunii și curentului.

b) Determinarea erorii relative de măsură între rezistența etalon utilizate și rezistența determinată experimental cu legea lui Ohm.

c) Ridicarea caracteristicilor $I = f(R)$ și $U = f(R)$

3. SCHEMA EXPERIMENTALĂ ȘI APARATELE DE MĂSURĂ

ATR – autotransformator 8A, 250V

A – ampermetru (UNITRA, MAVO – 35)

V – voltmetru (UNITRA, MAVO – 35)

K – comutator

P – punte redresoare

R_e – rezistența fixă, etalonată $R_e = 2500 \Omega$

4. MODUL DE LUCRU

Se execută montajul din figura 1. După conectarea la tensiunea de 220V prin intermediul comutatorului K a autotransformatului, se variază tensiunea de ieșire din autotransformator și valorile citite se trec în tabelul 1.

Cu valorile citite se calculează rezistența cu ajutorul legii lui Ohm și eroarea de măsură.

5. TABELUL DE DATE ȘI REZULTATE OBȚINUTE

TABELUL 1

Nr. crt.	U [V]	I [A]	$R = U/I[\Omega]$	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Se vor trasa grafic caracteristicile: $I = f(R)$ și $U = f(R)$

STUDIUL CIRCUITULUI SERIE R, L, C ÎN REGIM PERMANENT SINUSOIDAL

1. Chestiuni teoretice

Considerăm circuitul format dintr-un rezistor cu rezistența R , o bobină cu inducția L și un condensator cu capacitatea C , legate în serie și alimentate cu o tensiune sinusoidală.

$$u = \sqrt{2}U \sin \omega t \quad (1)$$

Curentul se poate calcula cu ajutorul impedanței echivalente complexe, care este suma impedanțelor elementelor conectate în serie.

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = Ze^{j\varphi} \quad (2)$$

Curentul complex sub tensiunea la borne $\underline{U} = U$, luată ca origine de fază, este:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{Z} = \frac{U}{Z} e^{j\varphi} \quad (3)$$

Dacă se notează cu $X = X_L - X_C$ reactanța circuitului, unde:

$X_L = \omega L$ - reactanță inductivă

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \text{ - reactanța capacitivă} \quad (4)$$

Expresia curentului va fi dată de relația:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{R + jX} \quad (5)$$

a cărei valoare efectivă va fi:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} = I(\omega) \quad (6)$$

în care $\omega = 2\pi f$ (f - frecvența)

Modulul impedanței complexe are expresia:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (7)$$

1.1. Diagrama fazorială a tensiunilor.

Din relațiile (2) și (3) se obține:

$$\underline{U} = R \cdot \underline{I} + j \cdot \omega \cdot L \cdot \underline{I} - j \cdot \frac{\underline{I}}{\omega \cdot C} = \underline{U}_R + j \cdot \underline{U}_L - j \cdot \underline{U}_C \quad (8)$$

Dacă se reprezintă fazorial relația (8) se obține reprezentarea din fig.1.

Din relația (2) și din fig.1 rezultă că:

$$\varphi = \arctg \frac{\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{R}$$

iar $R = Z \cos \varphi$ și $X = Z \sin \varphi$

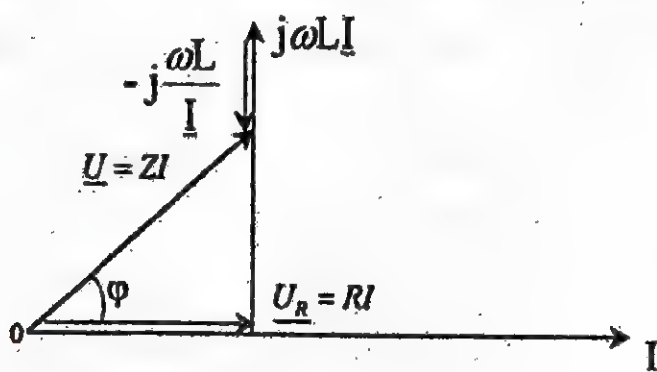


Fig. 1 Diagrama fazorială a tensiunii pentru un circuit R, L, C serie

1.2 Rezonanța de tensiune

Circuitul serie format dintr-un rezistor, o bobină și un condensator în regim permanent sinusoidal, se află în rezonanță atunci când $X=0$ adică este îndeplinită condiția:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (9)$$

Relația (9) este condiția de rezonanță a circuitului serie R, L, C. Condiția de rezonanță se obține prin două moduri:

- a) Menținând ω - constant și variind L sau C;

b) Menținând L și C constante și variind pe ω .

Pulsația de rezonanță și frecvența de rezonanță au următoarele expresii:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10)$$

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (11)$$

Din reprezentarea fazorială (fig.1) se observă că la rezonanță căderea de tensiune inductivă este compensată de cea capacitivă; din acest motiv, rezonanța circuitului serie R, L, C este numită **rezonanță de tensiune**.

În cazul rezonanței, tensiunile la bornele bobinei și condensatorului sunt: $\underline{U}_L = \underline{U}_C$.

În fig.2 sunt prezentate curbele de rezonanță ale curentului I , tensiunilor U_L, U_C și defazajul ϕ în funcție de pulsația ω .

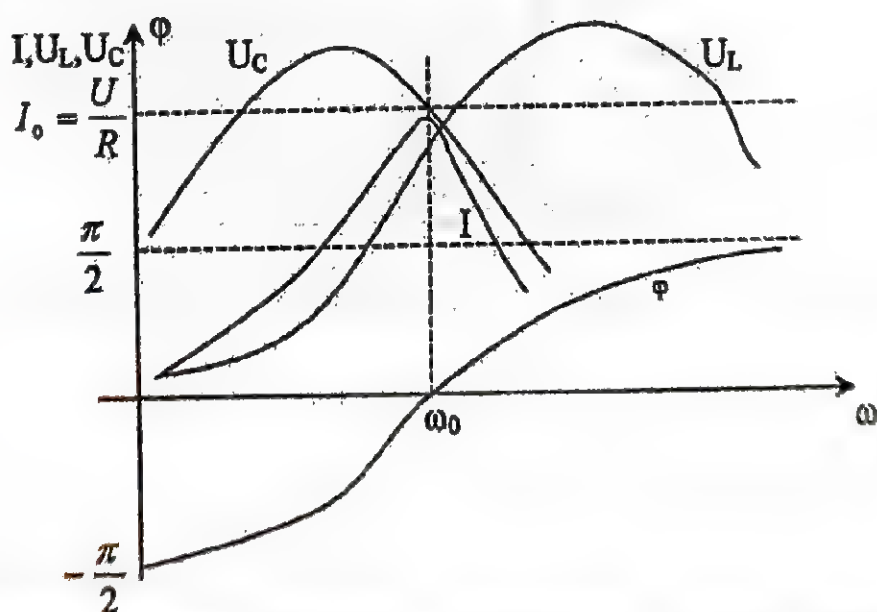


Fig.2 Reprezentarea curbelor de rezonanță ale curentului, tensiunilor inductive și capacitive și defazajului în funcție de pulsație

2. Chestiuni de studiat

2.1. Rezonanța circuitului serie R, L, C în cazul alimentării cu tensiuni de frecvență industrială (50 Hz).

a) Se vor construi diagramele fazoriale ale tensiunilor pentru diferite valori ale reactanței inductive X_L a bobinei, valoarea X_L călcându-se cu relația:

$$X_L = \sqrt{\left(\frac{U_L}{I}\right)^2 - r_L^2} \quad (12)$$

în care U_L este tensiunea care se măsoară la bornele bobinei cu un voltmetru iar I este intensitatea curentului din circuit. (se dă $R_L = \dots$).

b) Pentru diferite valori ale inductivității L , se vor trasa caracteristicile: $I = f_1(x_L)$; $U_L = f_2(x_L)$; $U_C = f_3(x_L)$

c) Se va pune în evidență punctul de rezonanță, determinându-se în acest caz I și verificându-se relația $U_L = U_C$ precum și faptul că $I = \frac{U}{R}$ (din calcul și pe cale experimentală prin citire la ampermetru).

3. Scheme experimentale și aparate de măsură folosite:

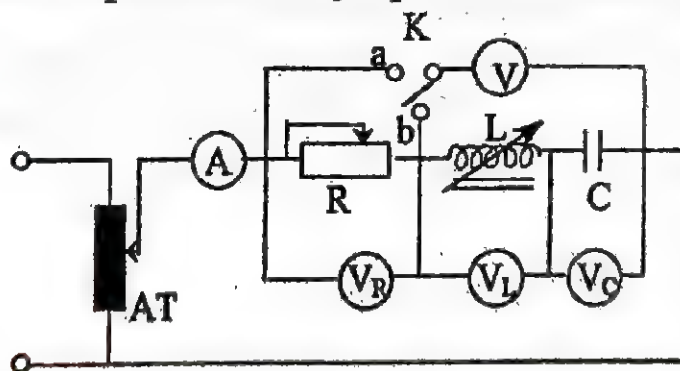


Fig. 3 Schema de lucru a unui circuit serie R, L, C în regim permanent sinusoidal

AT – autotransformator

A – MAVO 35

V_C – voltmetru 65 V – 130 V

V, V_L, V_C – voltmetre (MAVO35 - UNITRA)

- R – reostat 580 Ω
 L – bobină cu miez magnetic variabil
 C – condensator 16 μF

4. Modele de lucru

Miezul magnetic al bobinei se introduce complet în interiorul bobinei. În acest fel bobina are inductanța, deci și reactanța X_L maximă.

Se variază contactul mobil al autotransformatorului AT astfel încât voltmetrul V cu comutatorul în poziția (a) să indice circa 80 V. Se citește I la ampermetru A, U_R la V_R , U_L la V_L , U_C la V_C . În tot acest timp U citită la voltmetru V rămâne constantă.

Se trece apoi miezul în poziția extremă (se scoate afară complet din bobină). Bobina va avea inductivitatea minimă și deci reactanța minimă. Se repetă operațiile de mai sus. Se calculează acum, ținând seama de relația (12), valorile extreme ale lui X_L ($X_{L\max}$ și $X_{L\min}$). Se repetă operațiile anterioare pentru diferite poziții ale miezului magnetic în interiorul bobinei. În acest fel pot fi reprezentate diagramele tensiunilor precum și caracteristicile specificate la punctul 2.1. b).

Se trece comutatorul k în poziția (b) pentru starea de rezonanță. În această poziție, trebuie ca V să indice, practic o valoare nulă ($U_{L0}=U_{C0}$, fiind și în opoziție).

5. Tabele de date și rezultate

Tabelul 1

Nr. crt	$r_L[\Omega]$	$I[A]$	$U_L[V]$	$U_C[V]$	$U_R[V]$	$X_L[\Omega]$	Obs.
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							
7.							

STUDIUL FORTELOR ELECTROMAGNETICE DE INTERACȚIUNE DINTRE DOUĂ BOBINE

1. Chestiuni teoretice

Se consideră un sistem de n circuite filiforme parcurse de curenții de conducție i_1, i_2, \dots, i_n și legate la surse de energie cu tensiuni electromotoare $e_{g1}, e_{g2}, \dots, e_{gn}$. Circuitele pot fi mobile sau imobile, iar t.e.m. și curenții, variabili în timp.

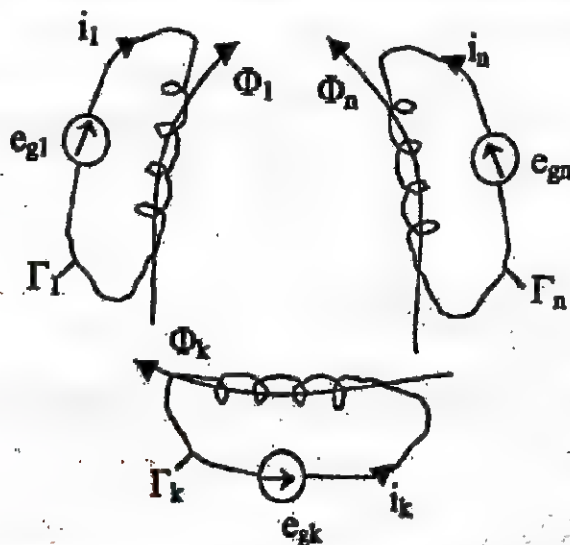


Fig. 1 Schema de principiu a unui sistem de n circuite filiforme

Energia totală debitată de surse în timpul dt este:

$\sum_{k=1}^n e_{gk} \cdot i_k dt$ și ea trebuie să acopere:

- pierderile de energie prin efect Joule – Lentz în rezistențele R_1, R_2, \dots, R_n ale circuitelor;
- variația de lucru mecanic efectuat de forțele din câmpul magnetic la deplasarea circuitului δL ;
- creșterea energiei mecanice dW_m , localizată în câmpul magnetic al circuitului.

Bilanțul energetic al sistemului în timpul dt este:

$$\sum_{k=1}^n e_{gk} \cdot i_k dt = \sum_{k=1}^n R_k \cdot i_k^2 dt + \delta \cdot L + d \cdot W_m \quad (1)$$

în care: $\delta L = X dx$ (2)

unde X este forța magnetică generalizată, iar x coordonata generalizată. În timpul dt , fluxurile prin circuite pot varia și se vor induce în circuite tensiuni electromotoare de forma:

$$e_{gk} = - \frac{d\phi_k}{dt} \quad (3)$$

Aplicând legea lui Ohm fiecărui circuit închis rezultă:

$$e_{gk} - \frac{d\phi_k}{dt} = R_k \cdot i_k \quad (4)$$

Înlocuind (4) în (1) se obține:

$$\sum_{k=1}^n \left(R_k \cdot i_k + \frac{d\phi_k}{dt} \right) \cdot i_k dt = \sum_{k=1}^n R_k \cdot i_k^2 dt + X dx + dW_m$$

din care rezultă:

$$dW_m = \sum_{k=1}^n i_k d\phi_k - X dx \quad (5)$$

Se consideră mediul liniar și corpurile imobile ($dx=0$). Relația (5) devine:

$$dW_m = \sum_{k=1}^n i_k d\phi_k \quad (6)$$

adică variația energiei magnetice este dată numai de variația fluxurilor magnetice (a curenților care le produc).

Pentru regimul cvasi-staționar se poate scrie, pe baza relațiilor lui Maxwell pentru inductivități, Φ_k într-o stare oarecare sub forma:

$$\phi_k = \sum_{j=1}^n L_{kj} \cdot i_j \quad (7)$$

Se notează cu λ raportul dintre intensitatea curențului într-o stare intermediară și intensitatea curențului în starea finală:

$$\lambda = \frac{i_j}{i_{j\text{final}}}, \text{ unde } 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (8)$$

Din (7) ținând seama de (8) rezultă:

$$\Phi_k = \sum_{j=1}^n L_{kj} \cdot \lambda \cdot i_{j\text{final}} = \lambda \cdot \sum_{j=1}^n L_{kj} i_{j\text{final}} \quad (9)$$

$$\text{Notând } \sum_{j=1}^n L_{kj} \cdot i_{j\text{final}} = \Phi_{k\text{final}} \text{ se obține: } \Phi_k = \lambda \cdot \Phi_{k\text{final}} \quad (10)$$

în care λ este același pentru toate circuitele și are valoarea 0 în starea inițială și 1 în starea finală.

Pentru o stare intermediară se scrie:

$$d\Phi_k = d\lambda \Phi_{k\text{final}} ; i_k = \lambda i_{k\text{final}} \quad (11)$$

Expresia variației energiei magnetice devine:

$$dW_m = \sum_{k=1}^n (i_{k\text{final}} \Phi_{k\text{final}}) \lambda d\lambda \quad (12)$$

$$\text{de } W_m = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^n i_k \cdot \Phi_k \quad (13)$$

Ținând seama de (7), relația (13) devine:

$$W_m = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{L_{kj} \cdot i_k \cdot i_j}{2} \quad (14)$$

Energia magnetică a două bobine cuplate magnetic (fig.2) este:

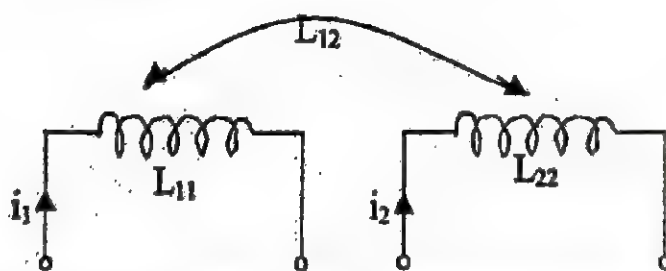


Fig. 2 Reprezentarea unui cuplaj magnetic dintre două bobine

$$W_m = \frac{L_{11} \cdot i_1^2}{2} + \frac{L_{12} \cdot i_2 \cdot i_1}{2} + \frac{L_{22} \cdot i_2^2}{2} \text{ sau}$$

$$W_m = \frac{L_{11} \cdot i_1^2}{2} + \frac{L_{22} \cdot i_2^2}{2} + L_{12} \cdot i_1 \cdot i_2 \quad (15)$$

Pentru calculul forței de interacțiune dintre cele două bobine, considerând curenții constanți se folosește relația:

$$(dW_m)_{i_k=ct} = d \left(\sum_{k=1}^n i_k \cdot \varphi_k \right)_{i_k=ct} - X dx \quad (16)$$

Conform relației (13) se scrie:

$$\left(\sum_{k=1}^n i_k \cdot \varphi_k \right)_{i_k=ct} = d \left(\sum_{k=1}^n i_k \cdot \varphi_k \right)_{i_k=ct} = 2(dW_m)_{i_k=ct} \text{ și rezultă:}$$

$$(dW_m)_{i_k=ct} = X dx \quad (17)$$

$$\text{de unde: } X = \left(\frac{\partial W_m}{\partial x} \right)_{i_k=ct} \quad (18)$$

Forța de interacțiune dintre cele două bobine, conform (18) va fi: $X = \left[\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{L_{11} \cdot i_1^2}{2} + \frac{L_{22} \cdot i_2^2}{2} + L_{12} \cdot i_1 \cdot i_2 \right) \right]_{i_1, i_2=ct}$

$$\text{de unde: } X = i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{\partial L_{12}}{\partial x} \quad (19)$$

deoarece inductivitățile proprii ale celor două bobine nu variază cu distanța x .

Pentru $i_1 = i_2$, atunci relația (19) devine:

$$X = i^2 \cdot \frac{\partial L_{12}}{\partial x} \quad (20)$$

deci variație parabolică a forței.

2. Chestiuni de studiat

a. Se va determina forța de interacțiune dintre o bobină fixă și una mobilă.

b. Se va trasa caracteristica $F=f(I)$ luându-se $I_1=I_2=I$.

3. Scheme experimentale și aparate de măsură utilizate

Pentru cele două puncte se utilizează schema din fig.3:

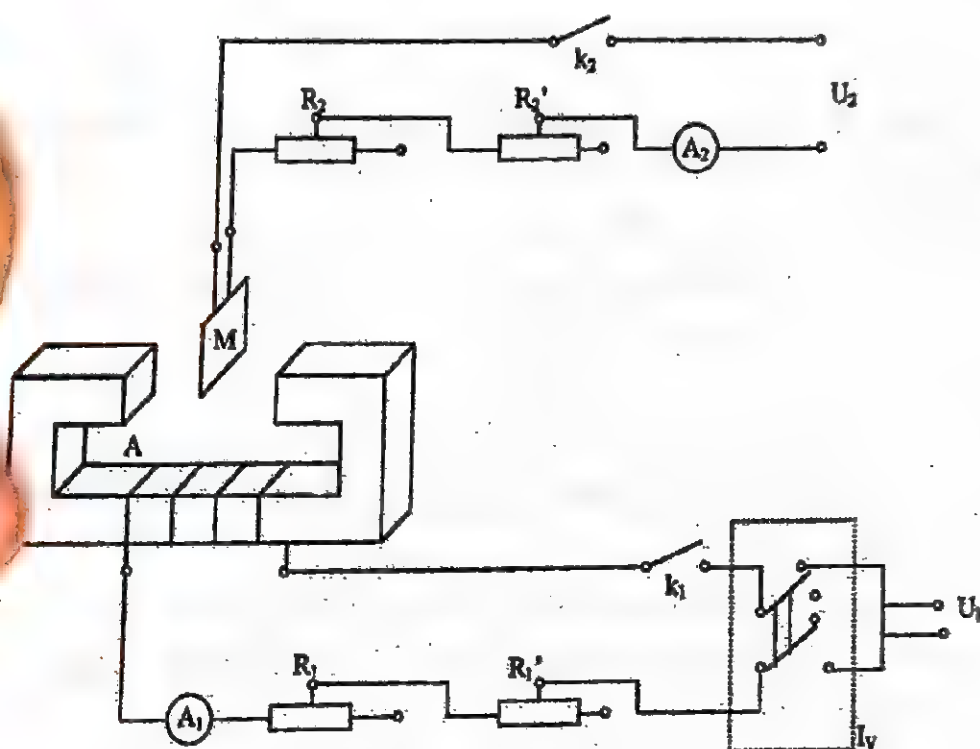


Fig. 3 Schema de lucru pentru determinarea experimentală a forței de interacțiune

- A – bobină fixă cu $N_1=6000$ spire;
- M – bobină mobilă cu $N_2=100$ spire;
- A_1, A_2 – ampermetre magnetoelectrice (MAVO) pentru măsurarea curentului I_1 , respectiv I_2 ($I_{1\max}=0,5$ A; $I_{2\max}=0,2$ A);
- R_1 – reostat pentru reglarea fină a curentului I_1 (2 x 1200 Ω , 0,63A);
- R_1 – reostat pentru reglarea brută a curentului I_1 (2 x 570, 1A);
- R_2 – reostat pentru reglarea fină a curentului I_2 (2 x 3500 Ω , 0,4A);

- R_2 – reostat pentru reglarea brută a curentului I_2 (2 x 570 Ω , 1A);
 k_1, k_2 – întrerupătoare;
 I_v – inversor.

4. Dispozitivul de măsură.

Bobina fixă este plasată pe un miez feromagnetic fixat pe placa suport. Miezul are un întrefier în care bobina mobilă M se poate deplasa pe verticală (de-a lungul coordonatei x).

Bobina mobilă este suspendată pe două arcuri elicoidale, prin care se și alimentează.

Bobina fixă A alimentată cu curentul continuu I_1 , determină în întrefierul miezului inducția magnetică B. În întrefier este plasată o latură a bobinei mobile M, parcursă de curentul I_2 .

Din interacțiunea câmpului B cu câmpul creat de curentul I_2 rezultă o forță care, pentru o asociere a sensurilor curenților I_1, I_2 , va avea sensul „în jos”.

Forța va fi proporțională cu inducția B și cu numărul de amperi – spire $I_2 N_2$ și, la neglijarea reluctanței fierului, B va fi proporțională cu $I_1 N_1$.

Determinarea forței F se face prin măsurarea săgeții arcurilor, prin care este alimentat echipamentul mobil, și care opun lui F forța elastică F_0 . La echilibru:

$$F_0 = K \Delta x = F \quad (21)$$

unde: k – constanta de elasticitate a arcurilor;

Δx – deplasarea relativă a bobinei mobile față de poziția inițială.

5. Modul de lucru

a. Pentru determinări experimentale se execută montajul din fig.3. Se conectează cele două bobine la tensiuni de curent

continuu de valori diferite (Bobina A se alimentează cu tensiunea continuă de 220 V, iar bobina M cu tensiunea continuă mai mică).

b. Se verifică dacă miezul electromagnetului este demagnetizat, alimentând bobina mobilă cu un curent apropiat de $I_{1\max}$, k_1 fiind deschis; dacă dispozitivul indică o valoare diferită de zero este necesară demagnetizarea miezului. În acest scop se procedează astfel:

- se închide k_1 și se deschide k_2 , iar cu ajutorul reostatelor R_1 și R_1' se reglează curentul I_1 până la o valoare egală cu $I_{1\max}$ pentru care inversorul I_v inversează de aproximativ 5 ori curentul, cu o frecvență maximă de 2 Hz.
- se micșorează apoi curentul cu a zecea parte din curentul precedent și se repetă procedeul de mai sus. Se micșorează curentul din nou cu aceeași ș.a.m.d. până la valoarea de 0,5 A.

Dacă miezul este demagnetizat (sau după o prealabilă demagnetizare) se închid k_1 și k_2 , IV fiind într-o poziție corespunzătoare polarităților indicate pe placa suport, lângă borne, și de exemplu pentru $I_2=0.1, 0.2, \dots, 0.5$ A.

Cu valorile obținute pentru x se determină forțele electromagnetice F_1 cu relația (21).

Valorile obținute cu relația (21) se compară cu valorile corespunzătoare, calculate cu relația:

$$F_2 = 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot I_1 \cdot N_1 \cdot I_2 \cdot N_2 \cdot l \text{ [N]}$$

în care l este lungimea laturii din întrefier (m).

Diferențele care vor apărea se datorează în principal faptului că lățimea bobinei mobile este mai mare decât l , diferența fiind plasată în fluxul de dispersie al electromagnetului.

c. Cu valorile obținute pentru $I_1=I_2=I$ se trasează caracteristica $F=f(I)$.

6. Tabel de date

Tabelul 1

Nr. crt	$I_1[A]$	$I_2[A]$	$F_1[N]$	$F_2[N]$	$\Delta F = F_1 - F_2[N]$
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					

DETERMINAREA IMPEDANȚEI ECHIVALENTE PENTRU „n” IMPEDANȚE CONECTATE ÎN SERIE

1. CHESTIUNI TEORETICE

Energia impedanței echivalneste pentru un circuit de impedanțe serie prezentate în figura 1 se deduce pornind de la următoarele observații:

- valoarea intensității curentului electric prin cele „n” impedanțe conectate în serie, are aceeași valoare

$$(I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n = I)$$

- căderile de tensiune aferente impedanțelor conectate în serie sunt diferite

$$(U_1 \neq U_2 \neq U_3 \neq \dots \neq U_n),$$

iar suma lor reprezintă căderea totală de tensiune pe cele „n” impedanțe.

Conform teoremei a II-a a lui Kirchhoff, vom avea:

$$\underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3 + \dots + \underline{U}_n \quad (1)$$

Dar ținând cont de legea lui Ohm și de observațiile făcute putem scrie:

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}$$

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_2 \underline{I}$$

$$\underline{U}_3 = \underline{Z}_3 \underline{I}$$

(2)

$$\underline{U} = \underline{Z}_n \underline{I}$$

Înlocuind relațiile (2) în relația (1) vom obține:

$$\begin{aligned}
 \underline{U} &= \underline{Z}_1 \underline{I} + \underline{Z}_2 \underline{I} + \underline{Z}_3 \underline{I} + \dots + \underline{Z}_n \underline{I} \\
 \underline{U} &= \underline{I} (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \dots + \underline{Z}_n) \\
 \underline{U}/\underline{I} &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \dots + \underline{Z}_n
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Ținând cont de expresia impedanței complexe în funcție de rezistență și reactanță ($\underline{Z} = R + jX$), relația devine:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}/\underline{I} &= R_1 + jX_1 + R_2 + jX_2 + R_3 + jX_3 + \dots + R_n + jX_n \\
 \underline{U}/\underline{I} &= (R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n) + j(X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n) \\
 \underline{U}/\underline{I} &= R_k + jX_k
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Raportul $\underline{U}/\underline{I}$ reprezintă impedanța echivalentă ce se atribuie laturii celor „n” impedanțe conectate în serie se pot înlocui cu 2 impedanțe echivalente în următoarele condiții:

- prin impedanța echivalentă circulă o intensitate a curentului prin cele „n” impedanțe
- căderea de tensiune pe impedanța echivalentă este egală cu căderea de tensiune pe cele „n” impedanțe.

În aceste condiții relația (4) devine:

$$\underline{Z}_e = R_k + jX_k = R_k + jX_e$$

2. CHESTIUNI DE STUDIAT

- a) Se va determina experimental valoarea impedanței echivalente
- b) Se va determina prin calcul valoarea impedanței echivalente
- c) Se va determina eroarea dintre cele două determinări

3. SCHEMA EXPERIMENTALĂ ȘI APARATELE DE MĂSURĂ UTILIZATE

ATR – autotransformator 8A, 220V

A – ampermetru 0÷250 V

K – comutator

MB – macheta de bază

R_1, R_2, R_3 – condensatoare electrice ($5\mu\text{F}$)

L_1, L_2 – bobine electrice cu inductivitatea de 10H

4. MODUL DE LUCRU

Se execută montajul din figură realizându-se înscrierea celor trei impedanțe a căror configurație este realizată pe macheta de bază.

Se conectează comutatorul K și prin intermediul autotransformatorului se alimentează circuitul cu tensiuni variabile de 50, 100, 250 și 150, 175 și 220 V, iar valorile obținute ale curentului și impedanței echivalente se trec în tabelul 1.

Se determină prin calcul impedanța echivalentă a celor trei impedanțe din configurația machetei.

Între cele două impedanțe echivalente obținute (impedanța echivalentă calculată și impedanța echivalentă determinată experimental) se determină eroarea de calcul.

5. TABELUL DE DATE ȘI REZULTATE OBȚINUTE

TABELUL 1

Nr. crt.	$\underline{U} [\text{V}]$	$\underline{I} [\text{A}]$	$\underline{Z}_{ec} [\Omega]$	$\underline{Z}_{ee} [\Omega]$		Obs.
1						
2						
3						
4						
5						
6						

DETERMINAREA IMPEDANȚEI ECHIVALENTE A „n” IMPEDANȚE CONECTATE ÎN DERIVAȚIE

1. CHESTIUNI TEORETICE

Această lucrare își propune să facă o analiză între determinarea pe cale experimentală și determinarea prin calcul a impedanței echivalente a „n” impedanțe conectate în derivație. Această analiză are ca obiectiv determinarea erorii relative între cele două impedanțe determinate pe cale experimentală și prin calcul. Vom considera un circuit electric alcătuit din „n” impedanțe conectate în derivație (fig.1) cu următoarele observații:

- căderile de tensiune pe cele „n” impedanțe conectate în derivație sunt egale

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 = \underline{U}_3 = \dots = \underline{U}_n = \underline{U}$$

- intensitățile curenților electrici prin cele „n” impedanțe sunt diferite

$$\underline{I}_1 \neq \underline{I}_2 \neq \underline{I}_3 \neq \dots \neq \underline{I}_n$$

Aplicând teorema I a lui Kirchhoff în nodul A, vom obține:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 + \dots + \underline{I}_n \quad (1)$$

Expresiile intensităților curenților electrici pentru fiecare impedanță în parte vor fi:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{U}/\underline{Z}_1 \\ \underline{I}_2 &= \underline{U}/\underline{Z}_2 \\ \underline{I}_3 &= \underline{U}/\underline{Z}_3 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \end{aligned} \quad (2)$$

$$I_n = \underline{U} / \underline{Z}_n$$

Înlocuind relațiile (2) în expresia (1) vom obține:

$$\underline{I}_1 = \underline{U} / \underline{Z}_1 + \underline{U} / \underline{Z}_2 + \underline{U} / \underline{Z}_3 + \dots + \underline{U} / \underline{Z}_n$$

Înlocuind impedanțele în funcție de admitanțe rezultă:

$$\begin{aligned} 1/\underline{Z} = \underline{Y} \quad \underline{I} &= \underline{U} \underline{Y}_1 + \underline{U} \underline{Y}_2 + \underline{U} \underline{Y}_3 + \dots + \underline{U} \underline{Y}_n \\ \underline{I} &= \underline{U} (\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \dots + \underline{Y}_n) \\ \underline{I} / \underline{U} &= \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \dots + \underline{Y}_n \end{aligned} \quad (3)$$

Cele „n” impedanțe conectate în derivație se pot înlocui cu o impedanță echivalentă în următoarele condiții:

- prin impedanța echivalentă circulă intensitate a curentului electric egală cu intensitatea curentului prin cele „n” impedanțe conectate în derivație;
- căderea de tensiune pe impedanța echivalentă este egală cu căderea de tensiune pe cele „n” impedanțe conectate în derivație.

Deci, raportul $\underline{I} / \underline{U}$ reprezintă admitanța echivalentă complexă a celor „n” impedanțe conectate în derivație ($\underline{Y}_e = \underline{I} / \underline{U}$).

Ținând cont de expresia admitanței complexe ($\underline{Y} = G + jB$) relația (3) devine:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_e &= G_1 + jB_1 + G_2 + jB_2 + G_3 + jB_3 + \dots + G_n + jB_n \\ \underline{Y}_e &= G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n + j(B_1 + B_2 + B_3 + \dots + B_n) \\ \underline{Y}_e &= G_k + jB_k \end{aligned}$$

Deci impedanța echivalentă a celor „n” impedanțe conectate în derivație va fi:

$$\underline{Y}_e = G_e + j B_e$$

2. CHESTIUNI DE STUDIAT

- a) Determinarea prin calcul a admitanței echivalente a „n” impedanțe conectate în derivație.

b) Determinarea experimentală a admitanței echivalente a „n” impedanțe conectate în derivație.

c) Determinarea erorii relative între admitanța echivalentă complexă determinată experimental și admitanța echivalentă complexă determinată prin calcul.

3. SCHEMA DE MONTAJ ȘI APARATELE DE MĂSURĂ UTILIZATE

ATR – autotransformator 8A, 220V

A – ampermetru $0 \div 5$ V

V – voltmetru $0 \div 5$ A

K – comutator

MB – macheta de bază

C_1, C_2 – condensatoare electrice $C = 5\mu\text{F}$

R_1, R_2, R_3 – rezistențe electrice ($4\ \Omega / 1\ \text{K}\Omega / 2,2\ \Omega$)

L_1, L_2 – bobine electrice cu inductivitatea de 10H

4. MODUL DE LUCRU

Se execută montajul din figura 2, cele trei impedanțe conectându-se în derivație și fiind racordate la bornele secundare ale autotransformatorului variabil.

Se închide comutatorul K și se alimentează schema de lucru a machetei cu trepte de tensiune de 50, 125, 150, 1785 și 200 V, iar valorile obținute ale curentului, tensiunii și admitanțelor se trec în tabelul 1.

Se determină prin calcul admitanța echivalentă a celor trei impedanțe conectate în derivație.

Se calculează eroarea de calcul dintre admitanța complexă echivalentă determinată prin calcul și admitanța complexă echivalentă determinată pe cale experimentală.

5. TABELUL DE DATE ȘI REZULTATE OBȚINUTE
TABELUL 1

Nr. crt.	\underline{U} [V]	\underline{I} [A]	\underline{Y}_{ec} [Ω]	\underline{Y}_{ee} [Ω]		Obs.
1						
2						
3						
4						
5						
6						

STUDIUL CIRCUITELOR DE CURENT ALTERNATIV TRIFAZAT ÎN REGIM PERMANENT SINUSOIDAL ÎN CONEXIUNE STEA

1. Chestiuni teoretice

Un sistem de trei circuite electrice în care acționează trei tensiuni electromotoare alternative, cu aceeași frecvență, dar cu faze inițiale diferite, formează un sistem trifazat de t.e.m., iar curenții care circulă prin aceste circuite formează un sistem trifazat de curenți.

Sistemele trifazate de mărimi pot fi simetrice sau nesimetrice. Sistemele sunt simetrice dacă au toate aceeași valoare efectivă, iar defazajele între două mărimi consecutive sunt egale cu $2\pi/3$.

Sistemele trifazate care nu îndeplinesc condițiile de înainte sunt nesimetrice. Sistemele trifazate de mărimi, cele mai utilizate, sunt cele *simetrice de succesiune directă* pentru care succesiunea mărimilor din diagrama fazorială este spre dreapta, iar în complex apar sub forma:

$$\underline{U}_1 = U; \underline{U}_2 = \underline{U} e^{-j\frac{2}{3}\pi}; \underline{U}_3 = \underline{U} e^{j\frac{2}{3}\pi} \quad (1)$$

Se mai utilizează *sistemele simetrice de succesiune inversă* (succesiunea mărimilor din diagrama fazorială este spre stânga) și *omopolară* caracterizate prin expresiile:

$$\underline{U}_1 = U; \underline{U}_2 = a \cdot \underline{U} = \underline{U} \cdot e^{-j\frac{2}{3}\pi}; \underline{U}_3 = a^2 \cdot \underline{U} = \underline{U} \cdot e^{j\frac{2}{3}\pi} \quad (2)$$

pentru succesiunea inversă și:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 = \underline{U}_3 = \underline{U} \quad (3)$$

pentru succesiunea omopolară.

Circuitele trifazate conțin generatoare și receptoare trifazate legate între ele prin linii electrice.

Se utilizează două moduri de conexiune ale circuitelor trifazate atât pentru generatoare cât și pentru receptoare:

- *conexiunea stea* (fig. 1), care se realizează legând bornele de sfârșit ale tuturor fazelor între ele, într-un punct comun numit *punct neutru*. Conductoarele ce leagă receptoarele de generator se numesc conductoare de linie.

Principalele relații între mărimile electrice corespunzătoare sunt:

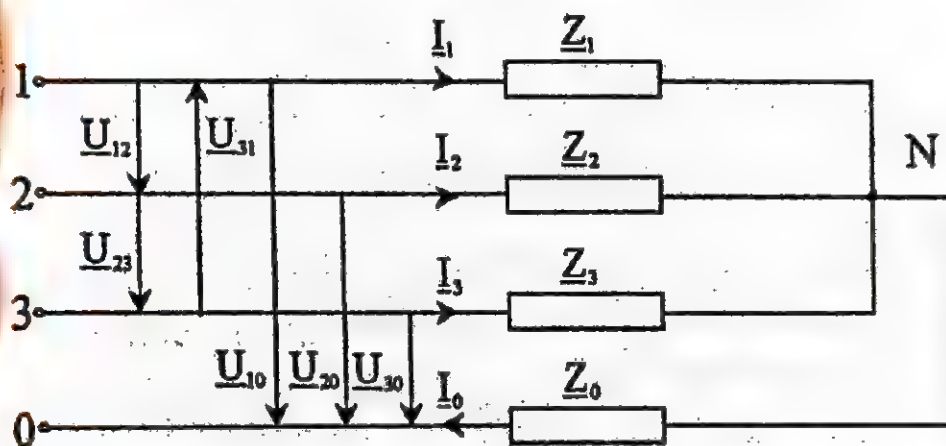


Fig. 1 Schema de principiu a unui sistem trifazat în conexiune „Y”

$$\begin{aligned} \underline{U}_{12} &= \underline{U}_{10} - \underline{U}_{20}; \quad \underline{U}_{23} = \underline{U}_{20} - \underline{U}_{30}; \quad \underline{U}_{31} = \underline{U}_{30} - \underline{U}_{10} \\ \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 &= \underline{I}_0 \end{aligned} \quad (4)$$

Pentru un receptor echilibrat (impedanțele pe fiecare fază egale), alimentat cu un sistem de tensiuni simetrice, legat în conexiune stea, diagrama fazorială a curenților și tensiunilor arată ca în fig. 2.

$$\begin{aligned} U_{10} &= U_{20} = U_{30} = U = U_f \\ U_{12} &= U_{23} = U_{31} = U_1 = \sqrt{3} \cdot U_f \\ I_1 &= I_2 = I_3 = I = I_1 \end{aligned} \quad (5)$$

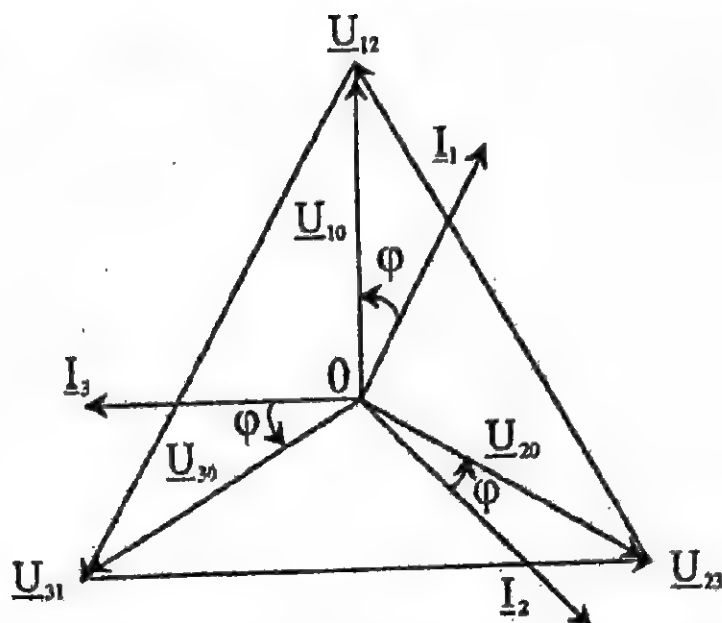


Fig. 2 Diagrama fazorială a tensiunilor și curenților unui circuit trifazat pentru un regim simetric

În cazul receptorului nesimetric, alimentat cu un sistem simetric de tensiuni, diagrama fazorială arată ca în fig.3. Pentru $\underline{Y}_1, \underline{Y}_2, \underline{Y}_3, \underline{Y}_0$ cunoscute rezultă:

$$\underline{U}_n = \frac{\underline{U}_{10} \cdot \underline{Y}_1 + \underline{U}_{20} \cdot \underline{Y}_2 + \underline{U}_{30} \cdot \underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_0} \quad (6)$$

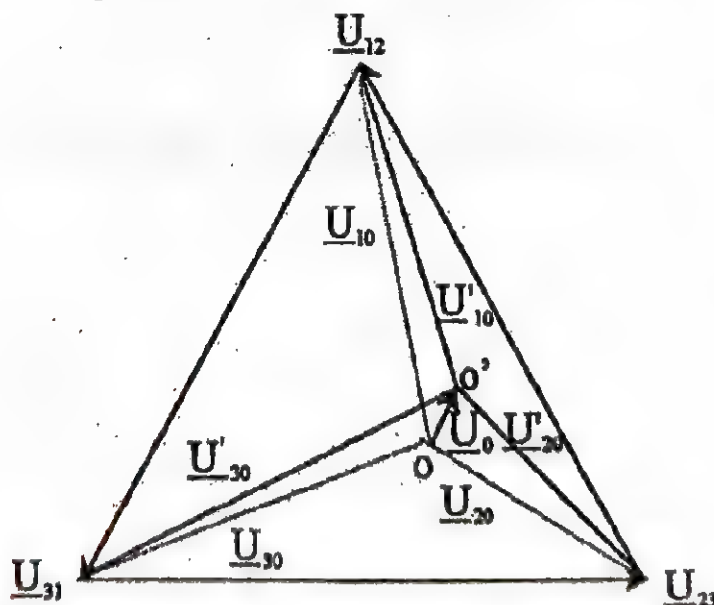


Fig. 3 Diagrama fazorială a tensiunilor pentru un regim nesimetric

2. Chestiuni de studiat

Se determină experimental curenții de linie și de fază și tensiunile de linie și de fază pentru un receptor trifazat pur rezistiv. Se studiază cazul conectării în stea a receptorului (regim simetric, regim dezechilibrat fără fir neutru, dezechilibrat cu fir neutru de rezistență practic nulă) și cazul conexiunii în triunghi a receptorului (regim simetric și regim dezechilibrat). Pe baza datelor obținute se desenează diagramele fazoriale prezentate în partea teoretică.

Pe aceste diagrame se verifică principalele relații (4, 5) stabilite pentru conexiunile respective și anume:

a) Pentru conexiunea stea simetrică (valori efective)

$$U_1 = U_{12} = U_{23} = U_{31} = \sqrt{3} \cdot U_f = \sqrt{3} \cdot U_{10} = \sqrt{3} \cdot U_{20} = \sqrt{3} \cdot U_{30}$$

b) Pentru conexiunea stea dezechilibrată fără fir neutru

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_{10} - \underline{U}_{20}; \quad \underline{U}_{23} = \underline{U}_{20} - \underline{U}_{30}; \quad \underline{U}_{31} = \underline{U}_{30} - \underline{U}_{10}$$

$$\underline{U}_{10} = \underline{U}_{10} - \underline{U}_n; \quad \underline{U}_{20} = \underline{U}_{20} - \underline{U}_n; \quad \underline{U}_{30} = \underline{U}_{30} - \underline{U}_n$$

unde cu $\underline{U}_{10}, \underline{U}_{20}, \underline{U}_{30}$, s-au notat tensiunile de fază ale rețelei, iar prin $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3$ tensiunile de fază ale receptorului. Se va verifica dacă segmentul $00'$ (fig. 3) între punctele comune ale fazorilor are lungimea multiplicată cu scara tensiunilor, egală cu valoarea măsurată U_0 între neutrul rețelei și al receptorului.

c) Pentru conexiunea stea dezechilibrată cu fir neutru de rezistență neglijabilă vom aplica teorema I a lui Kirckhoff în nodul N și vom obține

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{I}_0$$

Diagrama fazorilor curenților se construiește simplu deoarece aceștia se suprapun ca origine și direcție cu fazorii tensiunilor care formează un sistem simetric. Se va verifica dacă suma vectorială a acestor curenți are modulul egal cu valoarea măsurată I_0 a curențului din firul neutru.

d) Pentru conexiunea stea simetrică

$$I_1 = I_2 = I_3 = \sqrt{3} \cdot I_f = \sqrt{3} \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot I_2 = \sqrt{3} \cdot I_3$$

3. Scheme experimentale și aparate de măsură utilizate:

Pentru determinarea experimentală a parametrilor unui circuit trifazat în conexiune stea se utilizează schema din figura 4:

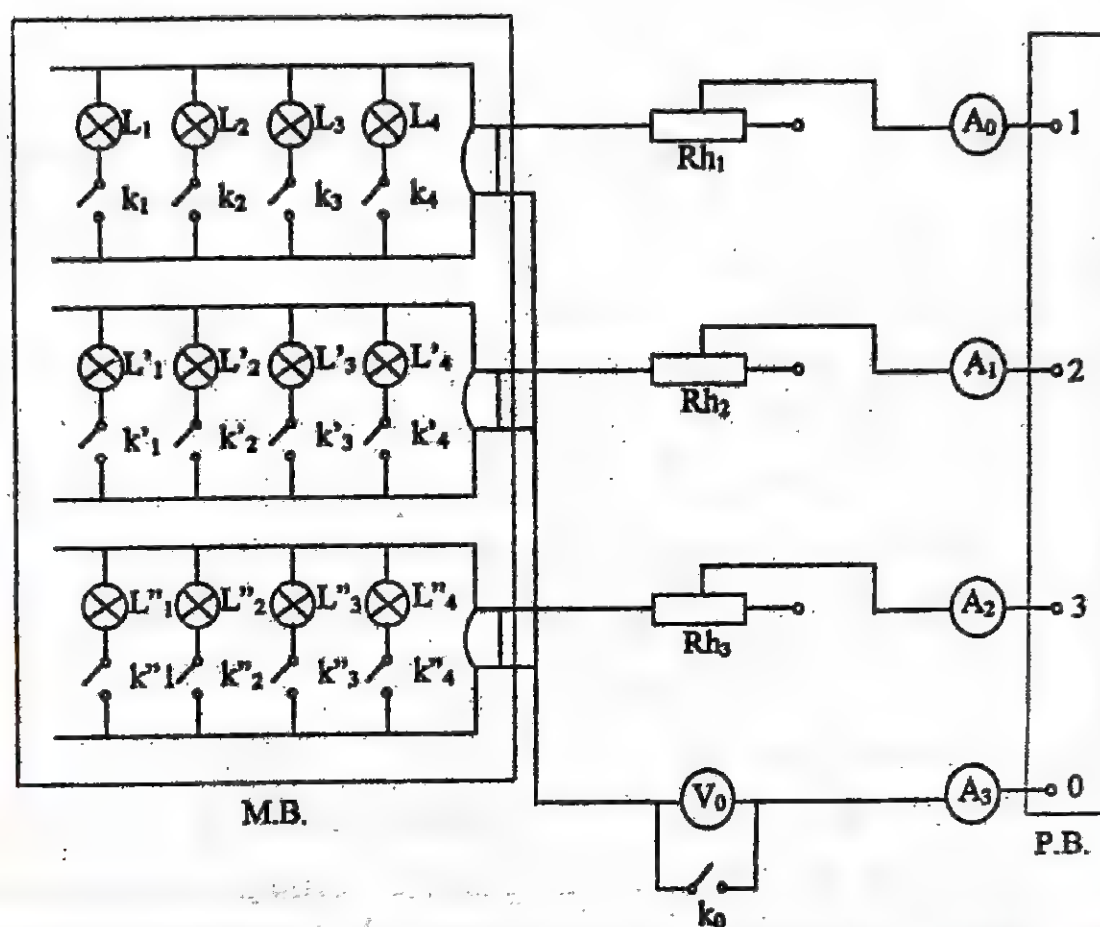


Fig. 4 Schema de lucru a unui circuit trifazat în conexiune stea

P.B. – placă de borne, de unde se alimentează schema

M.B. – montaj format din coloane de câte 4 becuri identice, în paralel cu întrerupătoarele individuale (de utilizează numai la conexiunea stea).

R_{h1} , R_{h2} , R_{h3} – reostate de 30Ω , 5A;

R_1 , R_2 , R_3 – reostate de câte două coloane, $2 \times 105\Omega$, 2,5A (se utilizează numai la conexiunea triunghi);

A_1 , A_2 , A_3 – ampermetre (MAVO 35);

A_4 , A_5 , A_6 – ampermetre electromagnetice, 10 A (se utilizează numai la conexiunea stea);

A_0 – ampermetru (MAVO 35), 1,5A (se utilizează numai la conexiunea stea);

K_0 – întrerupător;

V_0 – (MAVO 35) utilizat ca voltmetru;

V – voltmetru electromagnetic, de tensiune 500V pentru măsurarea tensiunilor de fază și de linie. Acesta se utilizează numai în momentul măsurării.

4. Modul de lucru

a) Sarcina echilibrată (simetrică) în conexiunea stea.

Se execută montajul din fig. 6 și se introduc toate cele 4 becuri în circuit la fiecare din cele trei faze. Reostatele R_{h1} , R_{h2} , R_{h3} se vor pune pe rezistența maximă pentru protejarea instalației. Dacă nu se obțin curenți egali pe cele trei ampermetre, se reglează rezistența reostatelor pe faze până când este îndeplinită această condiție. Se verifică dacă indicația lui A_0 cu k_0 închis este de asemenea practic nulă și dacă indicația lui V_0 este de asemenea aproape nulă (maxim 3V).

Se măsoară cu voltmetrul V , la placa de alimentare, toate tensiunile de fază și de linie.

b) Sarcina dezechilibrată în conexiunea stea fără fir neutru. Se execută cu același montaj ca la punctul a) întrerupătorul k_0 fiind deschis, se sting o parte din becuri astfel încât numărul becurilor aprinse să difere de la o fază la alta. La deschiderea lui k_0 neutrul receptorului este izolat față de cel al rețelei (rezistența voltmetrului V_0 fiind foarte mare) iar voltmetrul V_0 măsoară tensiunea între cele două puncte neutre O și O' . După crearea dezechilibrului se măsoară noile tensiuni de fază ale receptorului dezechilibrat în ansamblu (incluzând și reostatele R_h), punând o sondă a voltmetrului portabil pe o bornă aparținând neutrului receptorului de exemplu borna lui k_0 legată la cele trei coloane de becuri iar cealaltă sondă pe rând la bornele 1, 2, 3 ale plăcii de alimentare. Se citesc de asemenea tensiunile simetrice de linie între bornele 1, 2, 3 ale plăcii de alimentare. Se citesc de asemenea tensiunile simetrice de linie între bornele 1, 2, 3 ale plăcii luate câte două, deoarece este posibil ca tensiunea rețelei

să aibă variații. Se notează tensiunea U_0 indicată la voltmetrul V_0 .

c) Sarcina dezechilibrată în conexiunea stea cu fir neutru
Montajul anterior rămâne nemodificat, cu un număr diferit de becuri pe cele trei faze, dar cu întrerupătorul k_0 închis.

Se citesc I_1, I_2, I_3 și I_0 . De data aceasta tensiunile de fază și de linie ale receptorului în ansamblu sunt simetrice ca la punctul a). Se verifică acest lucru efectuând măsurătorilor la placa de borne cu voltmetrul portabil.

Pentru completarea diagramei fazoriale a tensiunilor de linie și de fază ale receptorului format numai din coloane de becuri se măsoară direct la bornele plăcii M.B. tensiunea de fază și de linie, precum și curenții I_1, I_2, I_3 .

5. Tabele de date și rezultate:

Cu rezultatele obținute se va întocmi următorul tabel de date:

Tabelul 1

Receptor	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	U_1 [V]	U_2 [V]	U_3 [V]	U_{12} [V]	U_{23} [V]	U_{31} [V]	U_n [V]		I_n [V]	
										măs graf		măs graf	
Echilibrat Cu fir de Nul													
Echilibrat Fără fir de Nul													
Dezechilib rat Fără fir de Nul													
Dezechilib rat Cu fir de Nul													

Lucrarea nr. 10

STUDIUL CIRCUITELOR DE CURENT ALTERNATIV TRIFAZAT ÎN REGIM PERMANENT SINUSOIDAL ÎN CONEXIUNE TRIUNGHI

1. Chestiuni teoretice

Se consideră trei circuite electrice racordate la trei tensiuni alternative, de aceeași frecvență, dar cu faze inițiale diferite formând un sistem trifazat de tensiuni, iar curenții ce circulă prin cele trei circuite alcătuiesc un sistem trifazat de curenți. Sisteme trifazate de mărimi pot fi simetrice (dacă au toate aceeași valoare efectivă, iar defazajele între două mărimi consecutive sunt egale cu $2\pi/3$) sau nesimetrice (la care mărimile nu au aceeași valoare efectivă).

1.1. Conexiunea triunghi

Conexiunea triunghi (fig.1) care se realizează legând sfârșitul unei faze cu începutul fazei următoare, punctele comune la două faze fiind borne propriu zise ale receptorului

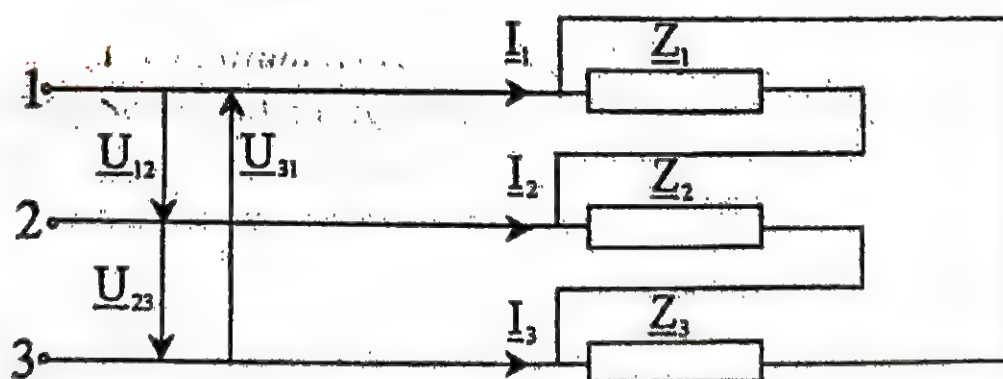


Fig.1. Schema de principiu a unui circuit trifazat în conexiune triunghi

Principalele relații între mărimile electrice corespunzătoare schemei sunt:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31}; \quad \underline{I}_2 = \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12}; \quad \underline{I}_3 = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{23} \quad (1)$$

Tensiunile $\underline{U}_{12}, \underline{U}_{23}, \underline{U}_{31}$ sunt și tensiuni de fază ale receptorului.

Pentru un receptor echilibrat legat în conexiune triunghi alimentat cu un sistem simetric de tensiuni, diagrama fazorială arată ca în fig.5.

$$\underline{I}_{12} = \underline{I}_{23} = \underline{I}_{31} = \underline{I}_f$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_3 = \underline{I}_l = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_f \quad (2)$$

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_{23} = \underline{U}_{31} = \underline{U}_f = \underline{U}_l$$

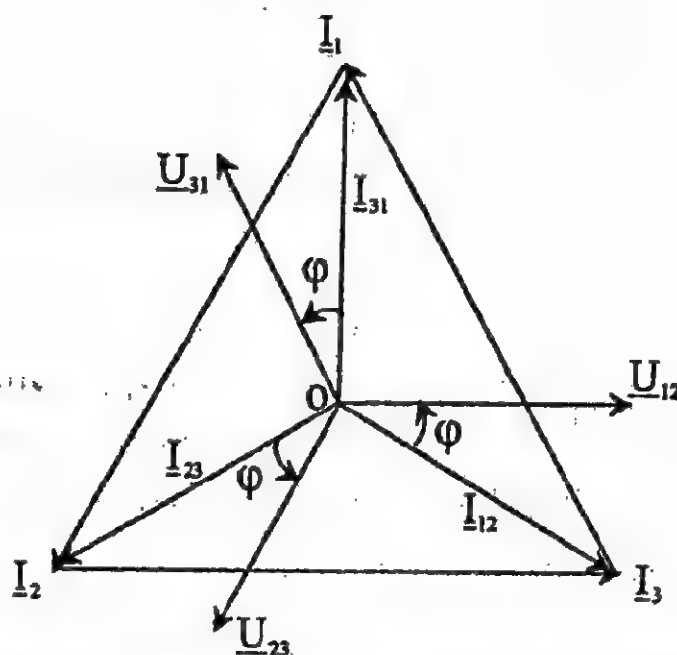


Fig. 2 Diagrama fazorială a tensiunilor și curenților pentru un circuit trifazat simetric

2. Chestiuni de studiat

Se va determina experimental curenții de fază și de linie precum și tensiunile de fază și de linie pentru cazul conectării în triunghi a unui receptor pentru un regim simetric și dezechilibrat

Pentru triunghi dezechilibrat aplicând teorema I a lui Kirckkoff, vom obține curenții de fază în funcție de curenții de linie pentru nodurile 1, 2 și 3:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31} ; \underline{I}_2 = \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12} ; \underline{I}_3 = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{23}$$

3. Scheme experimentale și aparate de măsură utilizate:
Pentru conexiunea triunghi se utilizează schema din fig. 3

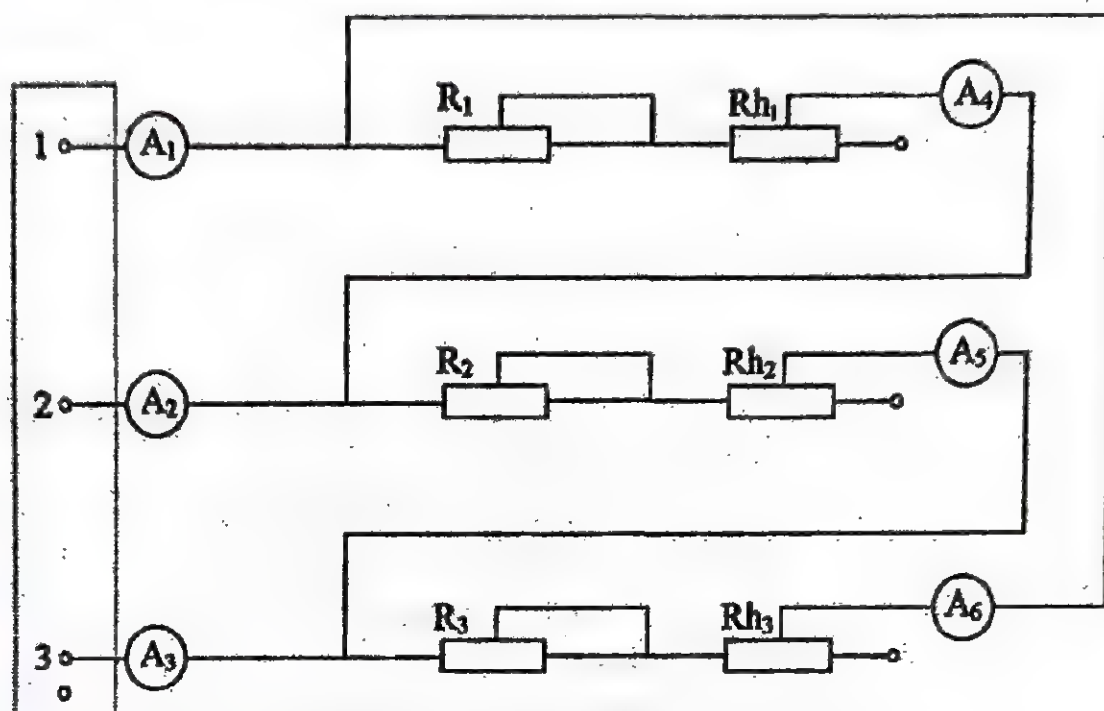


Fig. 3 Schema de lucru a unui circuit trifazat
în conexiune triunghi

P.B. – placă de borne, de unde se alimentează schema

M.B. – montaj format din coloane de câte 4 becuri identice, în paralel cu întrerupătoarele individuale (de utilizează numai la conexiunea stea).

R_{h1} , R_{h2} , R_{h3} – reostate de 30Ω , 5A;

R_1 , R_2 , R_3 – reostate de câte două coloane, $2 \times 105\Omega$, 2,5A (se utilizează numai la conexiunea triunghi);

A_1 , A_2 , A_3 – ampermetre (MAVO 35);

A_4 , A_5 , A_6 – ampermetre electromagnetice, 10 A (se utilizează numai la conexiunea stea);

A_0 – ampermetru (MAVO 35), 1,5A (se utilizează numai la conexiunea stea);

K_0 – întrerupător;

V_0 – (MAVO 35) utilizat ca voltmetru;

V – voltmetru electromagnetic, de tensiune 500V pentru măsurarea tensiunilor de fază și de linie. Acesta se utilizează numai în momentul măsurării.

4. Modul de lucru

Se execută montajul din figura 3 și vom analiza două situații:

- conexiune triunghi cu sarcină echilibrată
- conexiune triunghi cu sarcină dezechilibrată

a) Sarcina echilibrată în conexiunea triunghi

Se execută montajul din fig. 3. Reostatele R_{h1} , R_{h2} , R_{h3} se pun pe rezistența maximă pentru protejarea reostatelor R_1 , R_2 , R_3 care sunt de curent relativ mic. La reostatele R_1 , R_2 , R_3 nu se va utiliza pentru conexiuni borna cursorului ci două borne situate la aceleași extremități, iar cursorul se va afla la extremitatea opusă acestor borne.

Dacă nu se obțin curenți egali la ampermetrele A_1 , A_2 , A_3 se variază rezistențele unora din reostatele R_{h1} , R_{h2} , R_{h3} cu ajutorul cursorilor acestora până se obține egalitatea.

Se citesc curenții de fază I_{12} , I_{21} , I_{13} indicați de A_1 , A_2 , A_3 și curenții de linie I_1 , I_2 , I_3 indicați de A_4 , A_5 , A_6 .

b) Sarcina dezechilibrată în conexiunea triunghi.

Cu aceeași schemă ca la punctul a) se micșorează cu ajutorul cursorului rezistența la două din reostatele R_1 , R_2 , R_3 astfel încât curentul maxim indicat de ampermetrele A_1 , A_2 , A_3 să nu depășească 2,5 – 3 V.

Se citesc curenții de fază și de linie în acest regim nesimetric. Se măsoară tensiunile de linie la placa de borne de alimentare.

5. Tabele de date și rezultate:

Cu rezultatele experimentale obținute se vor întocmi următoarele tabele de date:

Lucrarea nr. 11

STUDIUL CIRCUITULUI CU REZONANȚĂ DE CURENT

1. Chestiuni teoretice

În lucrare se studiază un circuit paralel, alcătuit dintr-o bobină cu miez de fier cu inductivitatea reglabilă și un condensator fără pierderi, alimentat cu o tensiune alternativă sinusoidală cu valoare efectivă și frecvență constante în timp. Într-un asemenea circuit se poate pune în evidență rezonanța curenților.

Se consideră circuitul din fig.1, format dintr-o bobină cu miez de fier, conectată în paralel cu un condensator practic ideal (fără pierderi), de susceptanță $B_C = C\omega$.

Bobina reală, cu pierderi, poate fi reprezentată:

- fie printr-un circuit echivalent serie (fig. 1,a), caracterizat prin impedanța complexă echivalentă

$$\underline{Z}_1 = R_L + j \cdot X_L \quad (1)$$

respectiv prin rezistența echivalent R_L și prin reactanța echivalentă $X_L > 0$;

- fie printr-un circuit echivalent paralel (fig. 1,b), caracterizat prin admitanța complexă echivalentă:

$$\underline{Y}_L = G_L + j \cdot B_L \quad (2)$$

respectiv prin conductanța echivalentă G_L și prin susceptanța echivalentă $B_L < 0$.

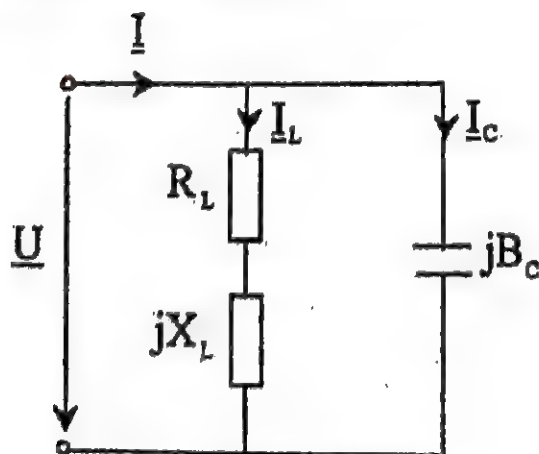


Fig.1 a)

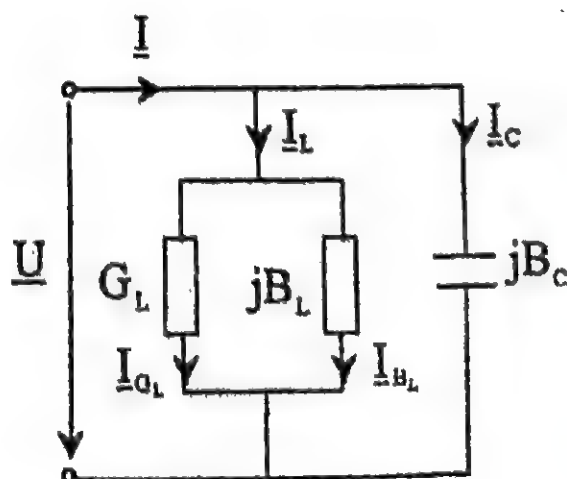


Fig.1 b)

Fig.1 a) – circuit echivalent serie

b) – circuit echivalent paralel

Între parametrii celor două circuite echivalente există relațiile complexe:

$$\underline{Z} = R_L + j \cdot X_L = \frac{1}{Y} = G_L + j \cdot B_L \quad (3)$$

sau relațiile echivalente

$$R_L = \frac{G_L}{G_L^2 + B_L^2}, \quad X_L = \frac{-B_L}{G_L^2 + B_L^2} \quad (4)$$

$$G_L = \frac{R_L}{R_L^2 + X_L^2}, \quad B_L = \frac{-X_L}{R_L^2 + X_L^2} \quad (5)$$

Observație. În cazul bobinei realizate cu conductorul filiform fără miez de fier, rezistența echivalentă R_L reprezintă chiar rezistența firului bobinei, iar reactanța echivalentă $X_L = L\omega$, unde L este inductivitatea bobinei; această relație arată modul în care variază reactanța bobinei în funcție de frecvență. Parametrii circuitului echivalent paralel rezultă din relațiile (5), iar reprezentarea circuitului paralel printr-un rezistor de conductanță G_L și a unei bobine ideale de susceptanță $B_L = -1/L'\omega$ nu este corectă decât pentru o singură valoare a frecvenței. În cazul bobinei cu miez de fier, în care se produc pierderi (prin fenomenul histerezis și prin curenții turbionari) nici unui parametru din cele două circuite echivalente nu i se poate da o interpretare atât de simplă ca pentru bobina fără miez de fier, parametrii rezultând din echivalări corespunzătoare unor transfigurări succesive ale unor circuite mixte, mai complicate.

Considerând bobina reprezentată prin circuitul echivalent paralel (fig. 1,b), rezultă următoarele relații între curenți.

$$\underline{I} = \underline{I}_L + \underline{I}_C = \underline{I}_{G_L} + \underline{I}_{B_L} + \underline{I}_C = G_L \cdot \underline{U} + j \cdot B_L \cdot \underline{U} + j \cdot B_C \cdot \underline{U} \quad (6)$$

sau

$$\underline{I} = [G_L + j \cdot (B_L + B_C)] \cdot \underline{U} \quad (7)$$

Dacă se introduc relațiile:

$$G_e = G_L \text{ (conductanța echivalentă)} \quad (8)$$

$$B_e = B_L + B_C \text{ (susceptanța echivalentă)} \quad (9)$$

se obține curentul în forma

$$\underline{I} = (G_e + j \cdot B_e) \cdot \underline{U} = \underline{Y}_e \cdot \underline{U} \quad (10)$$

unde

$$\underline{Y}_e = G_e + j \cdot B_e \quad (11)$$

este admitanța complexă echivalentă a circuitului.

Relației (10) îi corespunde circuitul echivalent din fig.1.c, în care sunt separate componentele active și reactive ale curentului.

Valoarea efectivă a curentului este:

$$I = U \cdot Y_e = U \cdot \sqrt{G_e^2 + B_e^2} = U \cdot \sqrt{G_L^2 + (B_L + B_C)^2} \quad (12)$$

iar defazajul curentului față de tensiune este:

$$\varphi = -\arctg \frac{B_e}{G_e} = -\arctg \frac{B_L + B_C}{G_L} \quad (13)$$

Întrucât susceptanța echivalentă a bobinei este negativă, iar susceptanța echivalentă a condensatorului este pozitivă, rezultă următoarele:

- circuitul este inductiv ($\varphi > 0$) dacă $B_C < |B_L|$;
- circuitul este capacitiv ($\varphi < 0$) dacă $B_C > |B_L|$;
- circuitul se comportă rezistiv ($\varphi = 0$) dacă $B_C =$

$|B_L|$; în acest caz mai avem relațiile $I_{BL} = I_C$ și în circuit se realizează starea de rezonanță a curenților. Curentul circuitului este în fază cu tensiunea la borne.

Dacă diferitele regimuri de funcționare se realizează prin modificarea inductivității bobinei în cazul alimentării circuitului la tensiunea U constantă, curentul I al circuitului, curentul I_L al bobinei și curentul I_C al condensatorului variază în funcție de susceptanța echivalentă $|B_L|$ a bobinei conform graficelor din fig.2.

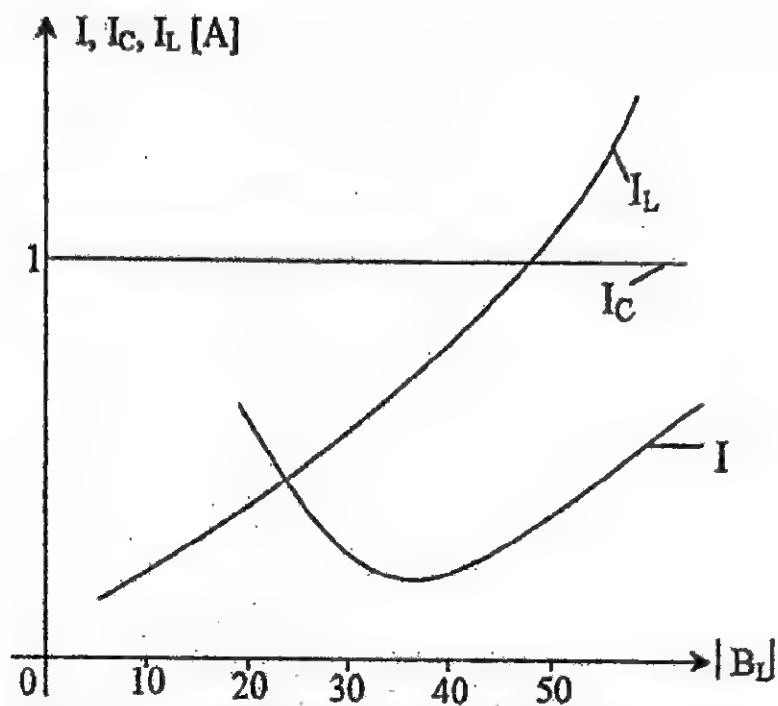
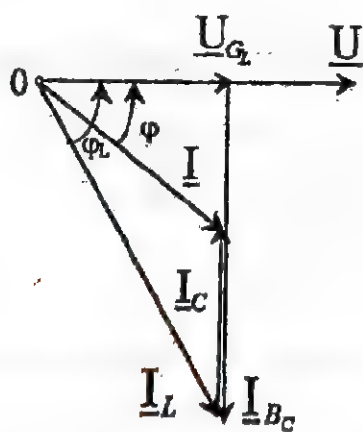


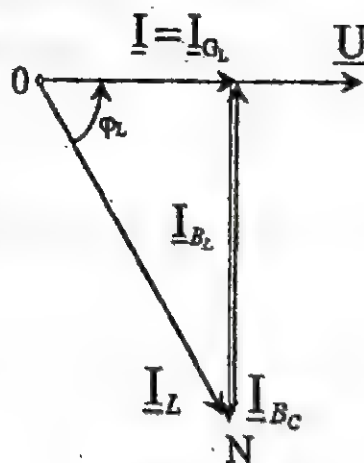
Fig. 2 Reprezentarea caracteristicilor $I=f(B_L)$, $I_C=f(B_L)$, $I_L=f(B_L)$

În figura 3 se prezintă diagramele fazoriale ale curenților, considerând faza tensiunii la bornele circuitului ca origine a fazelor.



$$|B_L| > B_C$$

Fig. 3 a)



$$|B_L| = B_C$$

Fig. 3 b)

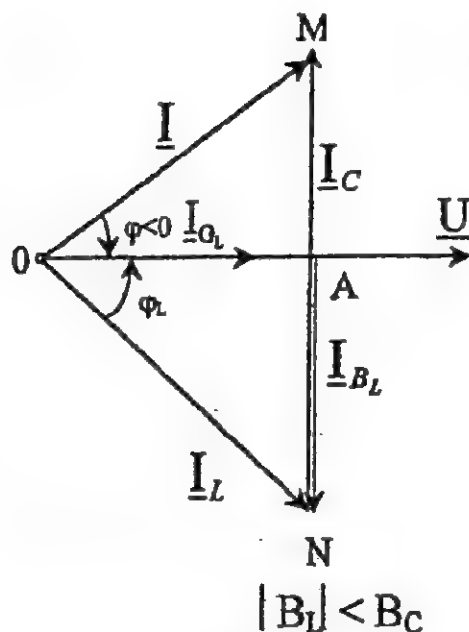


Fig. 3 c)

Fig.3a)–diagrama fazorială a curenților pentru regimul inductiv

3b)-diagrama fazorială a curenților pentru regimul rezistiv

3c)- diagrama fazorială a curenților pentru regimul capacitiv

Pentru a construi diagramele fazoriale cu valori măsurate ale curenților alegând tensiunea ca origine a fazelor se construiește, la scară, triunghiul OMN al curenților cu latura $MN=I_C$ perpendiculară pe direcția fazorului \underline{U} .

La rezonanță curentul circuitului are numai componentă reactivă:

$$I_0 = I_{G_L} = G_L \cdot U$$

iar defazajul circuitului este nul:

$$\varphi_0 = 0$$

Curentul bobinei $\underline{I}_L = \underline{I}_{G_L} + \underline{I}_{B_L}$ care are valoarea efectivă ceva mai mare decât a condensatorului și nu este exact în fază cu el. Dacă $G \gg |B_L|$, adică dacă bobina se apropie de bobina ideală se poate considera că la rezonanță $I_L = I_C$.

Rezistența echivalentă serie a bobinei R_L nu este riguros constantă în raport cu poziția miezului de fier al bobinei.

Oricare ar fi natura circuitului, rezistența echivalentă serie R_L și conductanța echivalentă paralel G_L se pot determina astfel:

a) Se măsoară puterea activă primită de bobină, curentul și tensiunea la borne. Elementele schemelor echivalente sunt:

$$R_L = \frac{P}{I_L^2}; G_L = \frac{P}{U^2}$$

b) Din diagrama fazorială a circuitului se determină componenta activă a curentului $I_a=0A$ și apoi

$$R_L = \frac{U \cdot I_a}{I_L^2}; G_L = \frac{I_a}{U} \quad (14)$$

c) Aplicând teorema lui Pitagora generalizată în triunghiul OMN se stabilește relația:

$$I^2 = I_L^2 + I_C^2 + 2I_L I_C \cos \varphi_L \quad (15)$$

de unde rezultă:

$$\cos \varphi_L = \frac{I^2 - I_L^2 - I_C^2}{2I_L I_C}$$

și apoi

$$R_L = Z_L \cdot \cos \varphi_L = \frac{U}{I_L} \cdot \cos \varphi_L; G_L = Y_L \cdot \cos \varphi_L = \frac{I_L}{U} \cdot \cos \varphi_L \quad (16)$$

2. Chestiuni de studiat

2.1. Se vor stabili trei regimuri ale circuitului paralel:

- inductiv ($|B_L| = 1,2B_C$);
- rezistiv ($|B_L| = B_C$);
- capacitiv ($|B_L| = 0,6B_C$);

și se vor construi diagramele fazoriale corespunzătoare (se indică un coeficient de scară de 0,2 A/cm).

2.2. Se vor determina experimental caracteristicile $I=f(B_L)$, $I_C=f(B_L)$, $I_L=f(B_L)$ și se vor construi graficele corespunzătoare pe aceeași figură.

3. Scheme experimentale și aparate de măsură utilizate

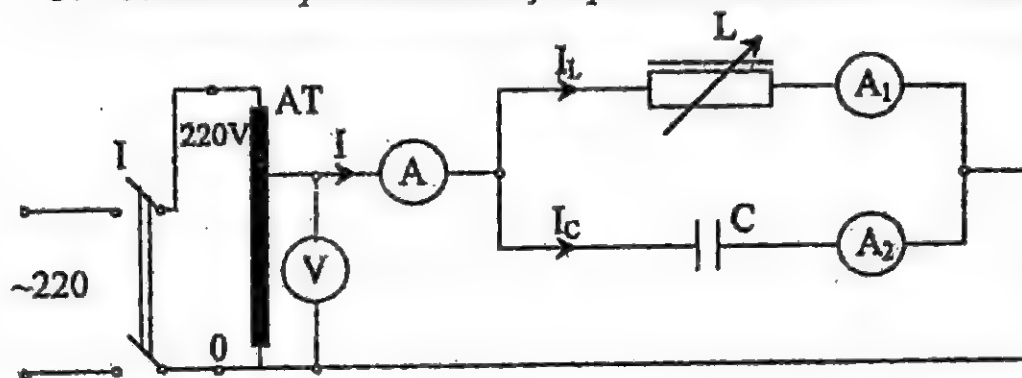


Fig. 4 Schema de lucru pentru determinarea celor trei regimuri de funcționare

Aparate de măsură utilizate:

- AT - autotransformator reglabil tip ATR – 8;
- I - întrerupător bipolar manual;
- A, A₁, A₂ - ampermetre de c.a. (MAVO 35, UNITRA);
- V - voltmetru (MAVO 35, UNITRA);
- L - bobină cu miez de fier;
- C - condensator electric de 7,5 μF (se conectează două condensatoare de 3,75 μF în paralel).

4. Modul de lucru

Se realizează montajul din figura 5. Cu autotransformatorul pe poziția de tensiune secundară nulă și cu miezul de fier introdus complet în bobină, se alimentează montajul, mai întâi de la pupitru și apoi prin închiderea întrerupătorului I. Se stabilește și început regimul de rezonanță al circuitului (recunoscut prin valoarea minimă a intensității curentului I) în scopul de a alege pentru tensiunea de alimentare o valoare convenabilă (I să poată fi determinat cu eroare de indicare mică). Tensiunea de alimentare va fi cuprinsă în limitele 30 – 50V.

Din măsurile efectuate la rezonanță se determină și rezistența bobinei R_L care se trece în antetul tabelului 1.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 1

[illegible]

CÂMPUL MAGNETIC ÎNVÂRTITOR

1. Chestiuni teoretice

Un câmp magnetic, caracterizat prin vectorul inducției magnetice \vec{B} este rotitor (învârtitor), dacă acest vector își păstrează modulul constant și se rotește în spațiu cu viteza unghiulară constantă ω (fig.1). Proiecțiile acestui vector pe cele două axe sunt:

$$\begin{aligned} B_x &= B \cdot \sin \omega t \\ B_y &= B \cdot \cos \omega t \end{aligned} \quad (1)$$

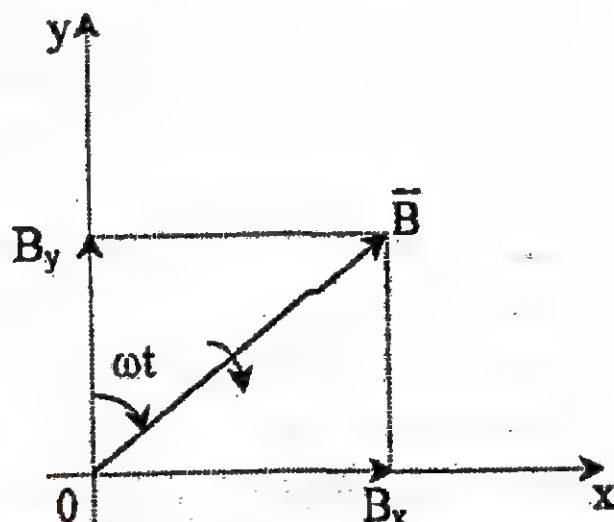


Fig. 1 Proiecția vectorului inducție magnetică

Câmpul magnetic învârtitor poate fi produs fie cu ajutorul dispozitivelor rotitoare care produc câmpuri magnetice cu mărime constantă în timp (o bobină parcursă de curent continuu, care se rotește uniform), fie cu dispozitivele producătoare de câmp magnetic fix în spațiu și variabil în timp. Lucrarea de față are în vedere cel de-al doilea mod de producere al câmpului magnetic învârtitor.

Un sistem trifazat de curenți sinusoidali pot produce un câmp magnetic învârtitor.

Se consideră trei bobine identice dispuse în spațiu la unghiuri de $\frac{2\pi}{3}$ unele față de altele și prin care circulă curenții:

$$\begin{aligned} i_1 &= \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin \omega t \\ i_2 &= \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_3 &= \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

care formează un sistem trifazat simetric direct. Acești curenți produc fiecare, în punctul 0, inducțiile magnetice (fig.2):

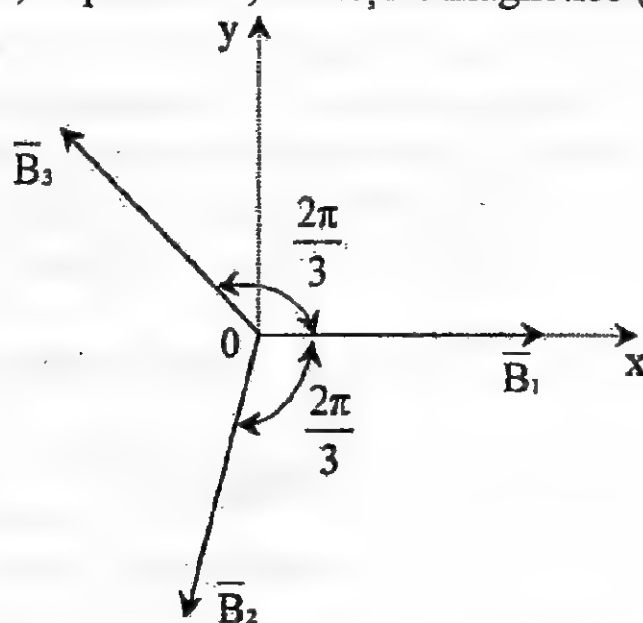


Fig. 2 Diagrama fazorială a inducțiilor magnetice

$$\begin{aligned} B_1 &= B_m \cdot \sin \omega t \\ B_2 &= B_m \cdot \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ B_3 &= B_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

variabile în timp, și dirijate normal pe axele bobinelor. Aceste trei inducții se compun și dau inducția rezultantă \vec{B} , care are componentele:

$$B_x = B_1 + B_2 \cdot \cos \frac{2\pi}{3} + B_3 \cdot \cos \frac{2\pi}{3} = \frac{3}{2} \cdot B_m \cdot \sin \omega t$$

$$B_y = B_3 \cdot \sin \frac{2\pi}{3} - B_2 \cdot \sin \frac{2\pi}{3} = \frac{3}{2} \cdot B_m \cdot \cos \omega t$$
(4)

Rezultă că prin acest procedeu se obține o inducție magnetică egală cu $\frac{3}{2}B_m$ care se rotește în spațiu cu viteza unghiulară ω , deci câmpul rezultat este un câmp învârtitor.

2. Chestiuni de studiat

2.1. Determinarea tensiunii induse într-o bobină cu axa variabilă într-un câmp magnetic fix în spațiu și variabil în timp.

2.2. Determinarea tensiunii induse într-o bobină cu axa variabilă pentru un câmp învârtitor produs de curenți defazați cu ajutorul unor bobine, condensatoare, și rezistoare.

3. Scheme experimentale și aparate de măsură utilizate

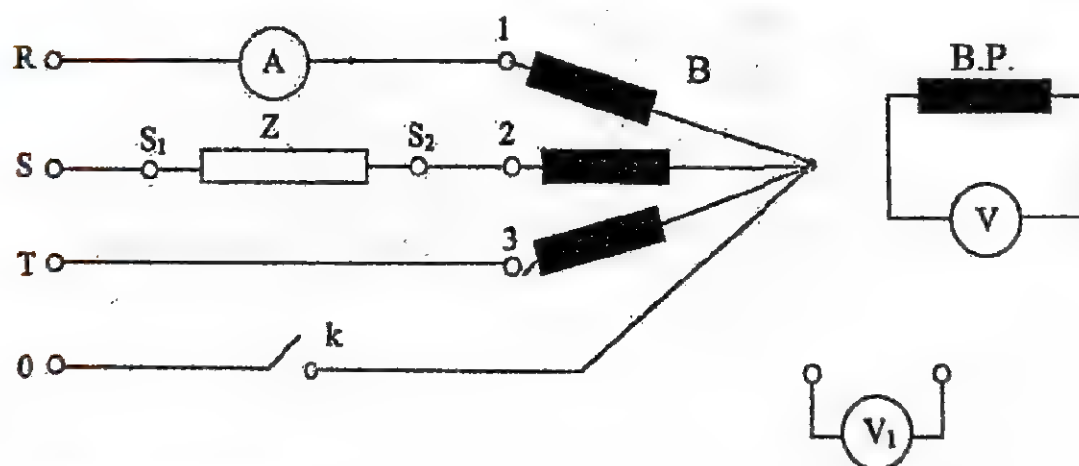


Fig. 3 Schema de lucru pentru determinarea tensiunii induse în bobina de probă

- B – grup de trei bobine identice, decalate reciproc în spațiu cu 120° ;
 B.P. – bobină de probă rotativă;

- Z – impedanță (condensator $C=2\mu F$, bobină reostat $R=2 \times 3500\Omega$, 0,4A);
 A – MAVO 35, (0,1A);
 V – voltmetru 3 V;
 V_1 – voltmetru 400 V;
 K – întrerupător monopolar.

4. Modul de lucru

4.1. Se execută schema din figura anterioară. Pentru punctul 2.1. se leagă numai faza R, alimentându-se numai o bobină cu k închis.

Se citește indicația voltmetrului V la interval de maxim 30° . Se notează indicația ampermetrului A . Se închide k , după deschiderea întrerupătorului de la tablou. Se conectează fazele R și T. Se efectuează aceleași măsurători, citindu-se în plus V_{10} și V_{20} .

4.2. Se conectează la tablou bornele R, S, T. Se scurtcircuitază bornele S_1 , S_2 . se obține un sistem trifazat simetric de curenți. Se efectuează aceleași măsurători, citindu-se toate tensiunile de fază și de linie.

4.3. Se conectează bornele R și S la borna R a tabloului de alimentare (borna S a acestuia rămânând liberă iar borna T menținându-se conectată la faza tabloului) k fiind deschis. Ca impedanță pentru crearea defazajului (Z) se conectează pe rând condensatorii C, bobina B1, apoi reostatul R.

5. Tabele de date și relații de calcul.

Tabel 1

Nr. crt.	I [A]	U_{10} [V]	U_{20} [V]	U_{30} [V]	U_{12} [V]	U_{23} [V]	U_{31} [V]	0°	30°	330°
1.											
2.											
3.											
4.											
5.											
6.											

Tabel 2

Nr. crt.	U_{\max} [V]	U_{\min} [V]	U_a [V]	U_f [V]	U_1 [V]	U_2 [V]
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						

Ținând seama că tensiunile măsurate sunt proporționale cu valorile câmpului magnetic ($B=KU$) în centru sistemului de bobine avem (fig. 4):

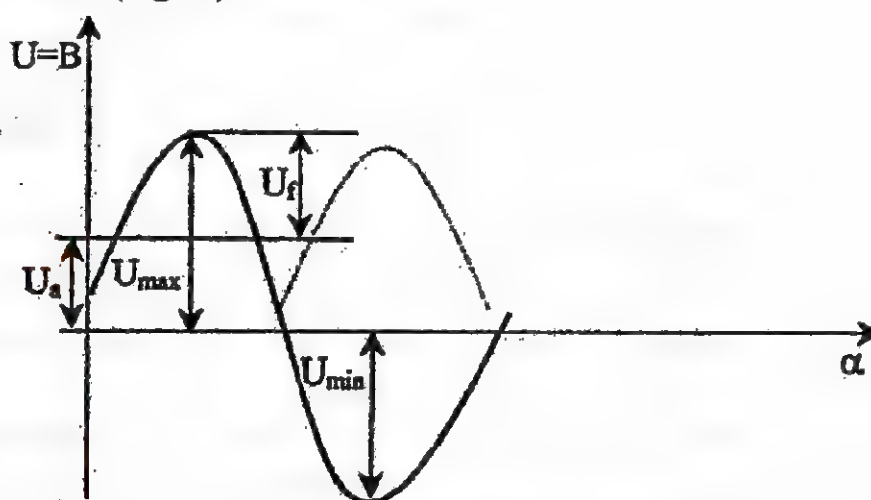


Fig. 4 Graficul de variație a tensiunii

$$U_a = \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2}; \quad U_f = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2}$$

$$U_1 = U_a + \frac{U_f}{2} = \frac{3}{4} \cdot U_{\max} + \frac{1}{4} \cdot U_{\min}$$

$$U_2 = \frac{U_f}{2} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2}$$

Aparatul de măsură cu redresor (V) nu sesizează inversarea polarității tensiunii. Din acest motiv este necesară inversarea porțiunii desenate punctat, astfel încât să se obțină o curbă sinusoidală.

DETERMINAREA PARAMETRILOR UNUI CIRCUIT DIPOLAR PASIV ÎN REGIM PERMANENT SINUSOIDAL

În lucrare se determină prin metode industriale parametrii care caracterizează în regim permanent armonic un circuit dipolar și pasiv: impedanța (admitanța) și defazajul, rezistența și reactanța echivalentă, respectiv conductanța și susceptanța echivalentă.

1. Chestiuni teoretice

Se consideră un circuit dipolar (denumit și uniport) liniar pasiv, funcționând în regim permanent armonic, având tensiunea la borne:

$$u = U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

și curentul:

$$i = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \beta) \quad (2)$$

cu sensurile de calcul asociate după regula adoptată pentru receptoare (fig.1).

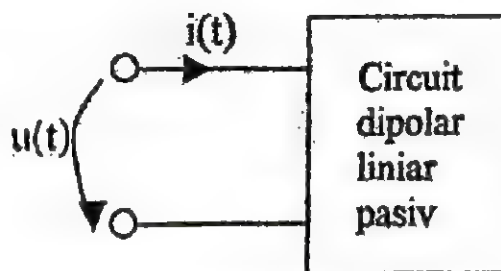


Fig. 1 Schema de principiu a unui circuit dipolar pasiv

Circuitul poate fi caracterizat în regim permanent armonic printr-o pereche de mărimi scalare care pot fi:

- impedanța (scalară) Z și defazajul φ (dintre tensiune și curent)

$$Z = \frac{U}{I}; \varphi = \alpha - \beta; \varphi \in \left[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2} \right] \quad (3)$$

b) admitanța (scalară) Y și defazajul φ

$$Y = \frac{I}{U}; \varphi = \alpha + \beta; \varphi \in \left[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2} \right] \quad (4)$$

c) rezistența echivalentă R_e și reactanța echivalentă X_e

$$R_e = Z \cdot \cos \varphi; X_e = Z \cdot \sin \varphi \quad (5)$$

d) conductanța echivalentă G_e și susceptanța echivalentă B_e

$$G_e = Y \cdot \cos \varphi; B_e = Y \cdot \sin \varphi \quad (6)$$

Aceste mărimi scalare derivă din impedanța complexă \underline{Z} sau admitanța complexă \underline{Y} , de care sunt legate prin relațiile:

$$\underline{Z} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U \cdot e^{j\alpha}}{I \cdot e^{j\beta}} = \frac{U}{I} \cdot e^{j(\alpha-\beta)} = Z \cdot e^{j\varphi} = R_e + jX_e \quad (7)$$

$$\underline{Y} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\underline{I}}{\underline{U}} = \frac{I \cdot e^{j\beta}}{U \cdot e^{j\alpha}} = \frac{I}{U} \cdot e^{-j(\alpha-\beta)} = Y \cdot e^{-j\varphi} = G_e + jB_e \quad (8)$$

unde \underline{U} și \underline{I} sunt expresiile în complex simplificat ale tensiunii u și curentului i :

$$\underline{U} = U \cdot e^{j\alpha}; \underline{I} = I \cdot e^{j\beta} \quad (9)$$

Din relațiile (7) și (8) mai rezultă și:

$$Z = \sqrt{R_e^2 + X_e^2}; \varphi = \arctg \frac{X_e}{R_e}; \varphi \in \left[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2} \right] \quad (10)$$

$$Y = \sqrt{G_e^2 + B_e^2}; \varphi = -\arctg \frac{B_e}{G_e} \quad (11)$$

$$\underline{Z} \cdot \underline{Y} = 1; Z \cdot Y = 1 \quad (12)$$

Funcție de parametrii menționați, circuitul dipolar poate fi prezentat printr-un circuit echivalent serie sau paralel, în care se pun în evidență componentele impedanței complexe \underline{Z} (fig.2.a.) și respectiv admitanței complexe \underline{Y} (fig 2.b).

Elementele circuitului echivalent paralel se pot deduce în funcție de cele ale circuitului echivalent serie utilizând relațiile (7), (8) și (12). Relațiile de calcul sunt:

$$G_e = \frac{R_e}{R_e^2 + X_e^2}; \quad B_e = -\frac{X_e}{R_e^2 + X_e^2} \quad (13)$$

Puterea aparentă complexă la bornele circuitului dipolar pasiv este:

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = U \cdot e^{j\alpha} \cdot I \cdot e^{-j\beta} = U \cdot I \cdot e^{j(\alpha-\beta)} = U \cdot I \cdot e^{j\varphi} = S \cdot e^{j\varphi} = P + j \cdot Q \quad (14)$$

$$\text{unde: } P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = R_e \cdot I^2 = G_e \cdot U^2; \quad (15)$$

$$\text{și } Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi = X_e \cdot I^2 = -B_e \cdot U^2; \quad (16)$$

reprezintă puterea activă și respectiv puterea reactivă la bornele circuitului dipolar.

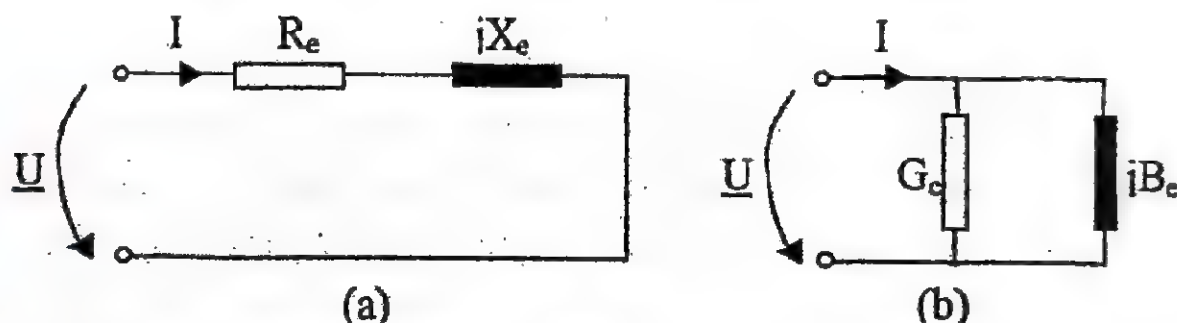


Fig. 2 Schema de principiu a unui circuit bipolar echivalent serie (a), paralel (b)

În cele ce urmează se vor prezenta două metode de determinare a parametrilor ce caracterizează, în regim permanent armonic, un circuit dipolar liniar și pasiv. În prezentarea metodelor se vor considera neglijabile consumurile proprii ale aparatelor de măsurat.

1.1. Metoda industrială (MI)

În metoda industrială se utilizează un ampermetru, un voltmetru și un wattmetru cu care se determină valorile efective ale curentului și tensiunii, precum și puterea activă primită de circuit de la o sursă de alimentare.

Relațiile de calcul a parametrilor circuitului sunt:

$$Z = \frac{U}{I}; Y = \frac{I}{U}; \varphi = \pm \arccos \frac{P}{U \cdot I}$$

$$R_e = \frac{P}{I^2}; X_e = \pm \sqrt{Z^2 - R_e^2}$$

$$G_e = \frac{P}{U^2}; B_e = \pm \sqrt{Y^2 - G_e^2}$$
(17)

Defazajul φ , respectiv reactanța X_e , sunt pozitive pentru circuit inductiv (pentru care susceptanța este negativă) și negative pentru circuit capacitiv (pentru care susceptanța este pozitivă).

Stabilirea semnului defazajului, reactanței și susceptanței în cazul în care nu este cunoscută natura circuitului se va face după procedeul prezentat la 1.3.

1.2. Metoda celor trei tensiuni (M3T)

Principiul acestei metode este ilustrat în figura 3. dacă dipolul de studiat prezintă impedanța complexă \underline{Z} , se asociază în serie un rezistor având rezistența (fig. 3.a) și se măsoară valorile efective ale tensiunilor: la bornele circuitului U_1 , la bornele rezistorului U_r și la bornele dipolului de studiat U și valoarea efectivă a curentului circuitului I .

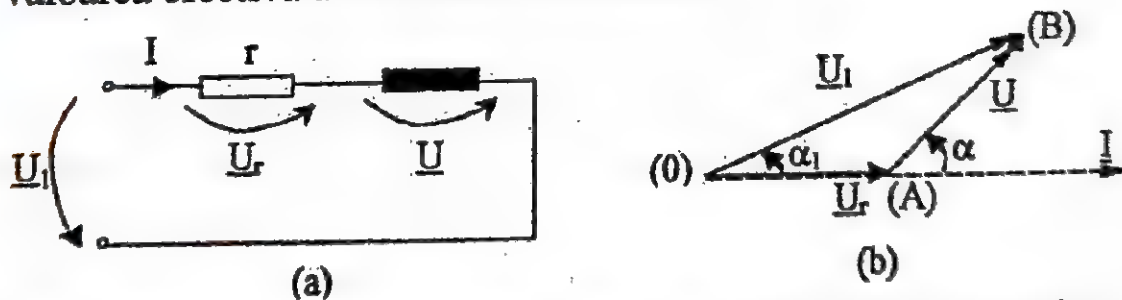


Fig. 3 a) Schema de principiu a unui dipol înseriat cu un rezistor

Fig. 3 b) Diagrama fazorială a tensiunilor

Considerând cunoscut fazorul \underline{I} se construiește diagrama fazorială din figura 3.b, unde din triunghiul AOB rezultă:

$$\cos \varphi = \frac{U^2 - U_1^2 - U_r^2}{2U_r U_1}, \text{ de unde rezultă:}$$

$$\varphi = \pm \arccos \frac{U^2 - U_1^2 - U_r^2}{2U_r U_1} \quad (18)$$

Parametrii circuitului dipolar studiat se determină cu relațiile (5), (6) și (17).

Semnul defazajului φ se determină procedând ca la punctul 1.3.

1.3. Determinarea naturii (inductive, capacitive) unui dipol pasiv

Este de remarcat că nici una din metodele prezentate anterior nu permite determinarea naturii dipolului studiat, respectiv a semnului reactanței echivalente (susceptanței echivalente). Pentru rezolvarea acestei probleme se poate proceda după cum urmează:

a) se determină prin oricare din metodele prezentate, modulul reactanței echivalente $|X_e|$ a dipolului care se studiază, după care se conectează în serie cu circuitul dipolar un condensator cu reactanța cunoscută $X_c = -\frac{1}{\omega C}$.

Pentru acest nou circuit dipolar se determină modulul reactanței echivalente $|X_e^i| = |X_e + X_c|$. Excluzând cazul banal, $X_e = 0$, un raționament simplu ne arată că dacă $|X_e^i| > |X_e|$ și $|X_e^i| > |X_c|$, dipolul studiat este capacitiv; în caz contrar dipolul este inductiv.

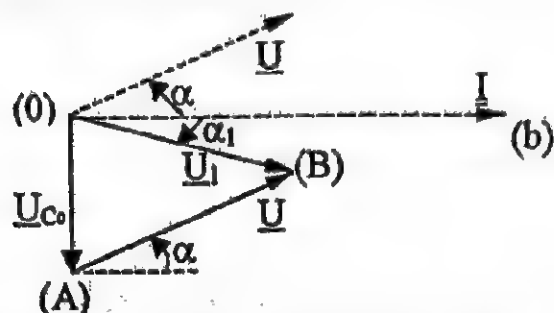
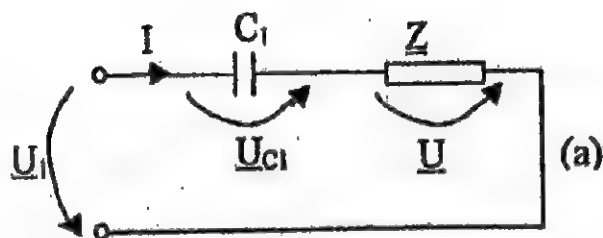


Fig. 4 a) Schema de principiu a unui dipol înseriat cu un condensator

Fig. 4 b) Diagrama fazorială a tensiunilor

b) se măsoară puterea reactivă Q a circuitului dipolar de studiat al cărei semn coincide cu cel al defazajului și al reactanței echivalente a circuitului (și opus semnelui susceptanței echivalente);

c) se aplică metoda celor trei tensiuni, înlocuind rezistorul cu un condensator (presupus ideal), ca în figura 4.a. Din diagrama fazorială a tensiunilor (figura 4.b) rezultă:

$$\cos \varphi = \frac{U^2 - U_1^2 - U_c^2}{2U_1U_c} \quad (19)$$

de unde rezultă:

$$\arccos \varphi = \frac{U^2 - U_1^2 - U_c^2}{2U_1U_c} \quad (20)$$

2. Chestiuni de studiat

2.1. Utilizarea metodei industriale pentru determinarea parametrilor circuitului echivalent serie și paralel al unor circuite dipolare pasive.

2.2. Utilizarea în același scop a metodei celor trei tensiuni.

2.3. Compararea rezultatelor obținute prin cele două metode.

2.4. Construirea diagramelor fazoriale pentru fiecare dipol studiat.

3. Schema experimentală și aparate de măsură utilizate

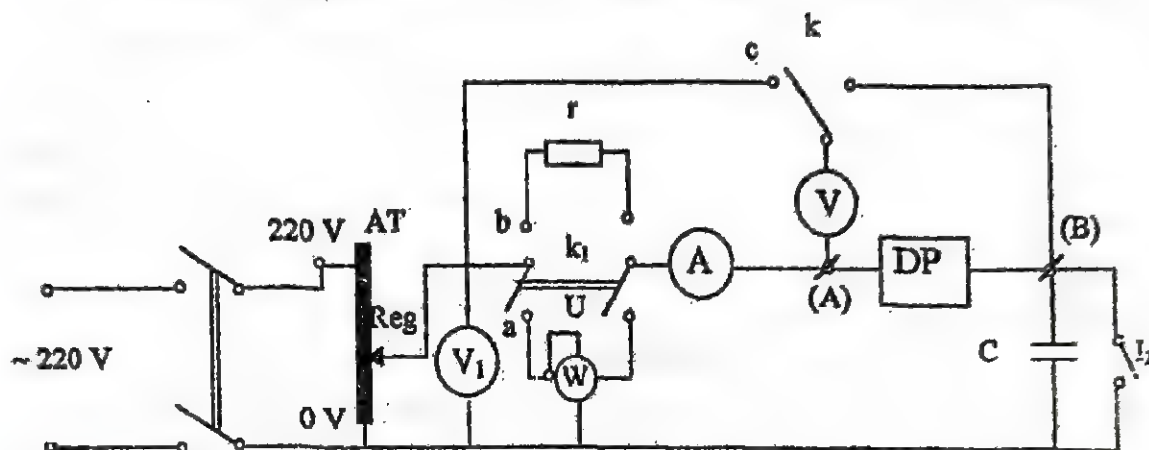


Fig. 5 Schema de lucru a unui dipol pasiv în regim permanent sinusoidal

- I_1 – întrerupător bipolar;
- AT – autotransformator reglabil, tip ATR 8;
- A – ampermetru (MAVO 35);
- V, V_1 – voltmetre (MAVO 35, UNITRA);
- W – wattmetru electrodinamic cu domeniile 150 V, 30 V/2,5A;
- DP – dipol pasiv realizat prin asocierea următoarelor elemente:
- R_1, R_2 – reostate de $105\Omega/2,5A$, folosite ca rezistențe fixe;
- C_2 – baterie de condensatoare, 153 μA ;
- B_1 – bobină cu miez de fier reglabil, trifazat, în conexiune monofazată;
- C – baterie de condensatoare electrice trifazată, 15 KVAR, 500V, conectată între două borne (capacitatea echivalentă de aproximativ 96 μF);
- I_2 – întrerupător monopolar;
- k – comutator monopolar;

- k_1 – comutator bipolar;
 R – reostat de $30\Omega/4\text{ A}$, utilizat ca rezistență fixă.

5. Modul de lucru

5.1. Se realizează montajul din figura 5, cu comutatorul k_1 închis în poziția a, care introduce wattmetrul în circuit, și comutatorul k deschis. Dipolul de studiat DP, conectat între bornele A și B, se obține după cum urmează:

I. Bobina trifazată cu miez de fier reglabil, în conexiune monofazată, având miezul introdus parțial astfel încât să prezinte o impedanță de aproximativ $150\ \Omega$ la frecvența de 50 Hz, se asociază în serie un rezistor de 105Ω , realizat prin utilizarea unui circuit al reostatului de $105\ \Omega/2,5\text{ A}$.

II. Condensatorului de $15,3\mu\text{F}$ se asociază în serie cu un rezistor de $105\ \Omega$, realizat cu un cilindru al altui reostat de $105\ \Omega/2,5\text{ A}$.

III. Se asociază în serie dipolii realizați la I și II;

IV. Se asociază în paralel dipolii realizați la I și II;

Pentru fiecare dipol se utilizează același montaj, descris mai sus, care se alimentează de la rețea închizând întrerupătorul I_1 cu autotransformatorul pe poziția de tensiune secundară nulă. Se închide întrerupătorul I_2 (se scurtcircuitează condensatorul C) și se crește tensiunea secundară a autotransformatorului până ce curentul circuitului devine de 1A. Se măsoară tensiunea U (cu voltmetrul V_1) și puterea activă P a circuitului dipolar (cu wattmetrul W). Valorile măsurate se trec în tabelul 1. Se deschide apoi întrerupătorul I_2 și se determină curentul I' și puterea P' ale noului circuit, în scopul stabilirii naturii (inductive sau capacitive) a dipolului studiat. Reactanța condensatorului C la frecvența de 50 Hz este $x_c \approx -30\Omega$.

Parametrii circuitului echivalent serie, respectiv paralel, ai dipolului studiat se determină cu relațiile (17). Rezultatele se trec în tabelul 1.

5.2. În montajul din figura 5 se pune comutatorul K_1 în poziția b, în care se introduce rezistorul r , și se închide comutatorul k în poziția c. Între bornele A și B vor fi conectați

dipolii de studiat realizați după indicațiile date la 5.1. Pentru fiecare dipol se măsoară curentul, tensiunea U_1 (cu voltmetrul V_1) și tensiunile U_r și U (cu voltmetrul V) închizând succesiv comutatorul k pe pozițiile c și d . Valorile măsurate se trec în tabelul 2.

Pentru fiecare dipol se efectuează două serii de măsurări, cu întrerupătorul I_2 închis, pentru determinarea modulului reactanței circuitului echivalent serie X_e , și cu întrerupătorul I_2 deschis, pentru determinarea modulului reactanței X'_e . Prin compararea acestor două reactanțe se determină semnul fiecărei reactanțe, respectiv natura – inductivă sau capacitivă – a dipolului studiat.

Valorile măsurate și rezultatele de calcul se trec în tabelul 2.

4. Tabele cu valori măsurate și rezultate de calcul

Utilizarea metodei industriale

Tabelul 1

Dipol studiat			I	II	III	IV
Valori măsurate	U	V				
	I	A				
	P	W				
	I'	W				
	P'	Ω				
Valori calculate	Z	Ω				
	Y	S				
	ϕ	Rad				
		Grd				
	R_e	Ω				
	$ X_e $	Ω				
	$ X'_e $	Ω				
	X_e	Ω				
	G_e	S				
	B_e	S				

Utilizarea metodei celor trei tensiuni

Tabelul 2

Dipol studiat:			I	II	III	IV
Valori măsurate	U_1					
	U_r					
	U					
	I					
	U_i					
	I'					
Valori calculate	Z					
	Y					
	$ X_e $					
	$ X'_e $					
	X_e					
	φ					
	R_e					
	G_e					
	B_e					

STUDIUL CUADRIPOULUI DIPORT LINIAR PASIV

1. Chestiuni teoretice

Cuadripol electric general \equiv circuit electric cu patru borne de acces, fără cuplaje magnetice cu exteriorul.

Cuadripol diport \equiv cuadripol pentru care cele patru borne sunt grupate în două perechi (porți), bornele fiecărei porți având curenți egali și de sensuri opuse (fig. 1). Poarta formată de bornele 1 - 1' se numește poartă de intrare și poarta formată de bornele 2 - 2' se numește poartă de ieșire.

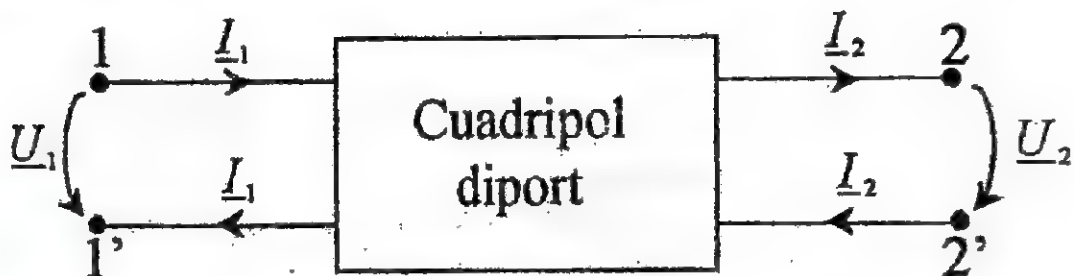


Fig. 1 Schema de principiu a unui cuadripol diport liniar pasiv

În funcție de structura internă a cuadripolilor, aceștia pot fi: *pasivi* (nu conțin surse de energie electromagnetică) și *activi*.

După natura elementelor componente, cuadripolilor pot fi: *liniari* și *neliniari*.

Cuadripolii care nu au în structură elemente disipative (rezistoare) sunt *cuadripoli fără pierderi*.

Cuadripolii diporți care respectă teorema reciprocității în raport cu porțile de intrare și ieșire scurtcircuitate fiecare, se numesc *cuadripoli reciproci*.

Studiul cuadripolilor este util întrucât aceștia constituie părți componente în circuite de transmisie a energiei sau semnalelor electromagnetice amplasate între generator și consumator (spre exemplu transformatoare, linii de transport, amplificatoare, filtre electrice). Deși structura lor poate fi relativ complicată,

teoria cuadripolilor permite o tratare unitară, independentă de structura internă, care ușurează mult analiza circuitelor din care fac parte.

Date fiind multiplele aplicații practice ale *cuadripolilor diporți liniari pasivi*, aceștia vor face obiectul lucrării de față. Studiul lor este util în *regim permanent sinusoidal*.

Funcționarea cuadripolilor diporți este complet descrisă de patru mărimi (\underline{U}_1 , \underline{I}_1 , \underline{U}_2 , \underline{I}_2) dintre care numai două sunt independente. Relațiile de interdependență între aceste mărimi pot fi exprimate sub diferite forme, dintre care cele mai uzuale sunt:

a) Ecuațiile în impedanțe:

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= \underline{Z}_{11} \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}_{12} \cdot \underline{I}_2 \\ \underline{U}_2 &= \underline{Z}_{21} \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}_{22} \cdot \underline{I}_2\end{aligned}\quad (1)$$

Mărimile \underline{Z}_{11} , \underline{Z}_{12} , \underline{Z}_{21} , \underline{Z}_{22} se numesc parametri impedanță.

b) Ecuațiile în admitanțe:

$$\begin{aligned}\underline{I}_1 &= \underline{Y}_{11} \cdot \underline{U}_1 + \underline{Y}_{12} \cdot \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 &= \underline{Y}_{21} \cdot \underline{U}_1 + \underline{Y}_{22} \cdot \underline{U}_2\end{aligned}\quad (2)$$

Mărimile \underline{Y}_{11} , \underline{Y}_{12} , \underline{Y}_{21} , \underline{Y}_{22} se numesc parametrii admitanță.

c) Ecuațiile fundamentale:

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= \underline{A} \cdot \underline{U}_2 + \underline{B} \cdot \underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 &= \underline{C} \cdot \underline{U}_2 + \underline{D} \cdot \underline{I}_2\end{aligned}\quad (3)$$

Mărimile \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} se numesc parametrii fundamentali ai cuadripolului.

Ca urmare, oricare categorie de parametrii (impedanță, admitanță sau fundamentali) dă informații complete asupra comportării cuadripolului. Ecuațiile (1), (2), (3) pot fi deduse unele din altele, astfel încât cunoașterea unei categorii de parametrii permite calcularea celorlate.

Semnificația parametrilor decurge din ecuațiile în care intervin. Spre exemplificare pentru parametrii impedanță, din (1) rezultă:

$$\underline{Z}_{11} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} \Big|_{\underline{I}_2=0} - \text{impedanța de intrare cu ieșirea în gol}; \quad (4)$$

$$\underline{Z}_{12} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_2} \Big|_{\underline{I}_1=0} - \text{impedanța de transfer cu intrarea în gol}; \quad (5)$$

$$\underline{Z}_{21} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_1} \Big|_{\underline{I}_2=0} - \text{impedanța de transfer cu ieșirea în gol}; \quad (6)$$

$$\underline{Z}_{22} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} \Big|_{\underline{I}_1=0} - \text{impedanța de ieșire cu intrarea în gol}. \quad (7)$$

Întrucât prezintă utilitate practică, se mai definesc următoarele impedanțe:

$$\underline{Z}_{1s} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} \Big|_{\underline{U}_2=0} - \text{impedanța de intrare cu ieșirea în scurtcircuit}; \quad (8)$$

$$\underline{Z}_{2s} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} \Big|_{\underline{U}_1=0} - \text{impedanța de ieșire cu intrarea în scurtcircuit}; \quad (9)$$

Relațiile (4) – (9) dau informații foarte clare asupra modului cum se pot măsura impedanțele respective.

În lucrare se propune determinarea experimentală a parametrilor impedanță pentru un cuadripol diport liniar pasiv și reciproc.

Algoritm general pentru măsurarea impedanțelor

Pentru determinarea experimentală a unei impedanțe \underline{Z} (fig. 2) aceasta se alimentează cu o tensiune sinusoidală de pulsație $\omega=2\pi f$

$$u(t) = U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \omega t \quad [\text{V}] \quad (10)$$

a cărei imagine complexă este:

$$\underline{U} = U \quad (11)$$

Impedanța va fi parcursă de un curent defazat față de tensiune cu unghiul electric φ , măsurat în sens direct (sens invers trigonometric)

$$i(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad [A] \quad (12)$$

a cărei imagine complexă este:

$$\underline{I} = I \cdot e^{-j\varphi} \quad (13)$$

Diagrama fazorială a mărimilor \underline{U} și \underline{I} se prezintă în fig.3.

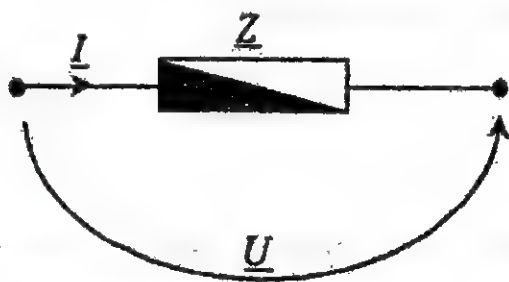


Fig. 2 Reprezentarea unei Impedanțe alimentate cu tensiune sinusoidală de pulsație ω



Fig. 3 Diagrama fazorială tensiune-curent

Pornind de la definiția impedanței complexe:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} \quad (14)$$

și înlocuind aici \underline{U} și \underline{I} din (11) și (13) rezultă:

$$\begin{aligned} \underline{Z} &= \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U}{I \cdot e^{-j\varphi}} = \frac{U \cdot e^{j0}}{I \cdot e^{-j\varphi}} = \frac{U}{I} \cdot e^{j\varphi} = \frac{U}{I} (\cos\varphi - j\sin\varphi) = \\ &= \frac{U}{I} \cdot \cos\varphi + j \cdot \frac{U}{I} \cdot \sin\varphi = R + jX \end{aligned} \quad (15)$$

unde:

$$R = \frac{U}{I} \cdot \cos\varphi \quad (16)$$

reprezintă componenta rezistivă (rezistența), totdeauna pozitivă și

$$X = \frac{U}{I} \cdot \sin \varphi \quad (17)$$

reprezintă componenta reactivă (reactanța), care poate fi pozitivă sau negativă, după cum impedanța are caracter inductiv ($X = \omega L$) sau capacitiv ($X = -1/\omega C$).

Modulul impedanței este:

$$Z = |\underline{\dot{Z}}| = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (18)$$

Relația (15) arată că pentru determinarea completă a impedanței este necesar să se cunoască valorile efective ale tensiunii – U și curentul – I (măsurabile cu aparate uzuale de curent alternativ – voltmetru și ampermetru), cât și defazajul între cele două mărimi – φ . Defazajul se poate măsura indirect, prin intermediul puterii active – P absorbită de impedanță (măsurabilă cu un wattmetru). Indicația wattmetrului va fi:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (19)$$

$$\text{de unde rezultă: } \cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I} \text{ și } \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \quad (20)$$

Înlocuind relațiile (20) în (16) și (17), rezultă cele două componente ale impedanței \underline{Z} .

Dacă impedanțele sunt de natură inductivă, se calculează inductivitatea echivalentă: $X = \omega L \Rightarrow L = \frac{X}{\omega}$ (21)

Dacă impedanțele sunt de natură capacitivă se calculează capacitatea echivalentă: $X = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow C = \frac{1}{\omega X}$ (22)

2. Chestiuni de studiat

2.1. Determinarea experimentală a unor impedanțe oarecare.

2.2. Determinarea experimentală a parametrilor impedanță ai unui cuadripol.

3. Scheme experimentale și aparate de măsură utilizate

3.1. Pentru determinarea experimentală a unor impedanțe oarecare se utilizează schema de măsurare din figura 4.

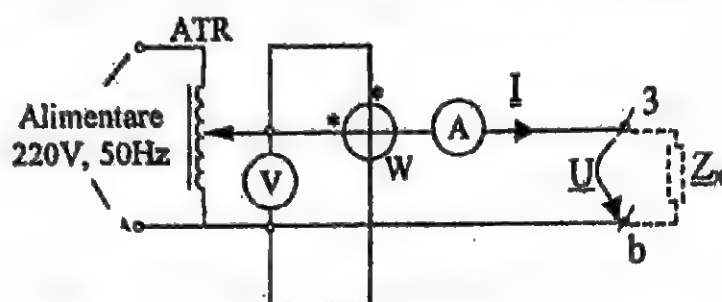


Fig. 4 Schema de lucru pentru determinarea experimentală a unei impedanțe

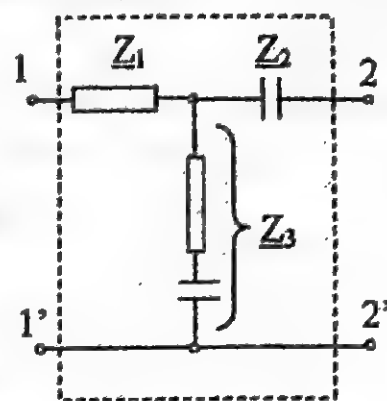


Fig. 5 Schema de principiu a unui monobloc de impedanțe

Elementele montajului sunt:

- ATR - autotransformator reglabil 220V; 0-240V; 8A;
- V - multimetru MAVO 35 sau UNITRA;
- A - multimetru MAVO 35 sau UNITRA;
- W - wattmetru electrodinamic;
- Z_x - impedanța necunoscută.

Ca impedanțe necunoscute se propune utilizarea impedanțelor Z_1 , Z_2 , Z_3 care compun cuadripolul, conform figurii 5.

3.2. Pentru determinarea experimentală a parametrilor impedanță ai cuadripolului realizat pe panoul din laborator se utilizează schemele de măsurare din figurile 6 – 9.

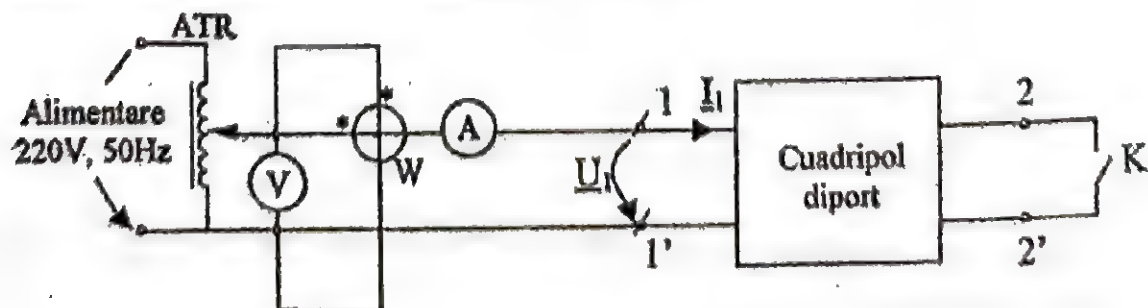


Fig. 6

Schema pentru măsurarea parametrilor \underline{Z}_{11} și \underline{Z}_{1s}

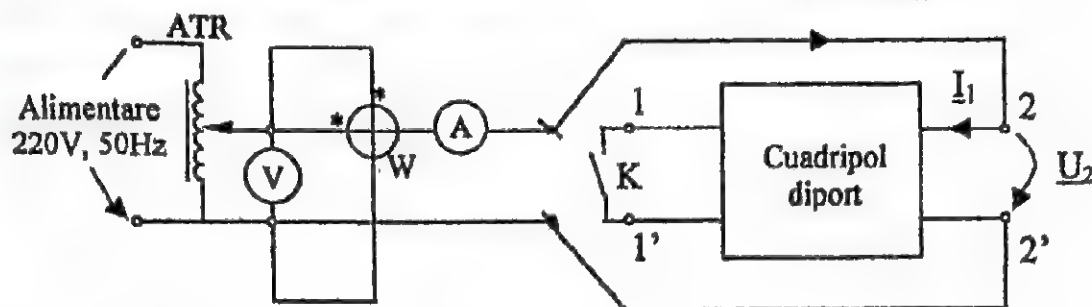


Fig. 7

Schema pentru măsurarea parametrilor \underline{Z}_{22} și \underline{Z}_{2s}

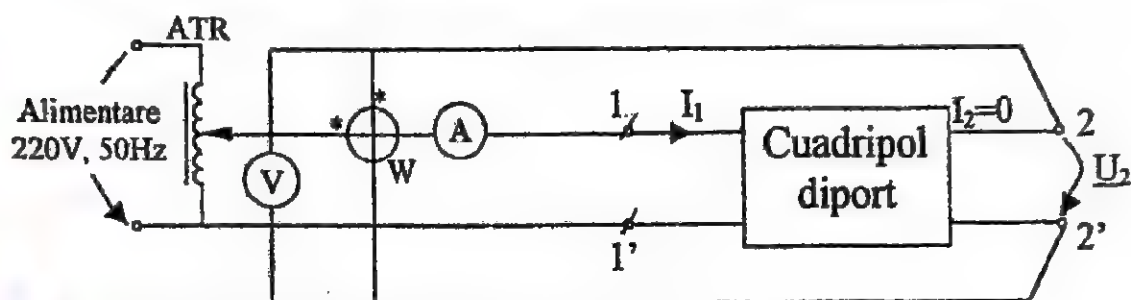


Fig. 8

Schema pentru măsurarea parametrului \underline{Z}_{21}

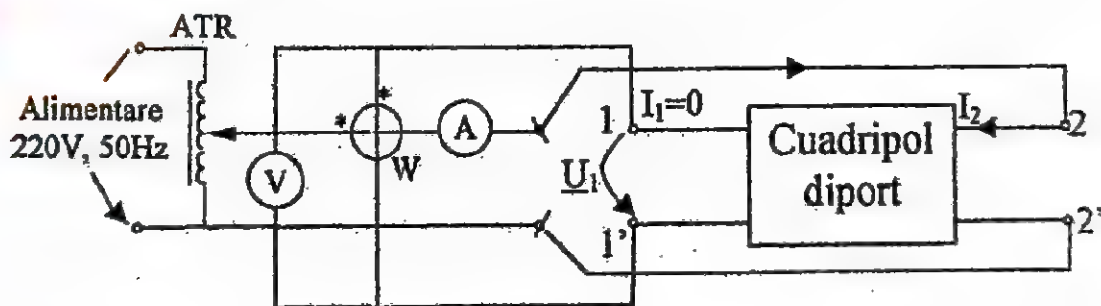


Fig. 9

Schema pentru măsurarea parametrului \underline{Z}_{12}

Elementele montajelor sunt aceleași ca la 3.1, cuadripolul diport reprezentat simplificat fiind cel din figura 5.

Se poate observa cu ușurință corelarea schemelor fig. 6 – 9 cu relațiile (4) – (9). Mărimile electrice indicate pe fiecare schemă se regăsesc în relațiile corespundente. Se exemplifică interpretarea schemei din figura 6: dacă impedanța \underline{Z}_{11} , dată de

(4) este definită pentru $I_2 = 0$, atunci bornele de ieșire 2 și 2' se lasă în gol (întrerupătorul K - deschis); de aceea alimentarea se face pe la bornele de intrare 1 și 1'. Se măsoară valorile efective ale tensiunii U_1 și curentului I_1 , care intervin în (4); wattmetrul este conectat astfel încât să măsoare indirect defazajul dintre tensiunea \underline{U}_1 (aplicată circuitului de tensiune) și curentul \underline{I}_1 (care parcurge circuitul de curent). Pentru determinarea impedanței \underline{Z}_{1s} dată de (8) se utilizează aceeași schemă, dar cu respectarea condiției $\underline{U}_2 = 0$ care presupune scurtcircuitarea bornelor de ieșire 2 și 2' (întrerupătorul K - închis).

4. Modul de lucru

4.1. Pentru determinarea experimentală a unor impedanțe se parcurg următoarele etape:

Se realizează montajul din figura 4, la bornele a și b conectând impedanțele Z_1 din figura 5;

Se reglează cursorul autotransformatorului pentru tensiune de ieșire minimă (poziția extremă în sens antiorar);

Se selectează domeniile aparatelor la valorile indicate la 3.1.

Se reglează lent cursorul autotransformatorului până când voltmetrul indică o tensiune cuprinsă între 70 V și 130 V;

Dacă indicația wattmetrului este negativă, nu s-a respectat modul de conectare al bornelor marcate; Se scoate montajul de sub tensiune și se face conectarea corectă;

Se notează indicațiile aparatelor de măsurat în tabelul 1;

Se reglează cursorul autotransformatorului pentru tensiune de ieșire minimă și se decuplează tensiunea de alimentare;

Se deconectează impedanța \underline{Z}_1 de la bornele a și b și se conectează \underline{Z}_2 , și se notează indicațiile aparatului;

Se deconectează impedanța \underline{Z}_2 de la bornele a și b și se conectează \underline{Z}_3 ;

Se efectuează calculele corespunzătoare cu relațiile (20), (18), (16), (17), (22), completându-se toate rubricile din tabelul 1;

Se compară rezultatele obținute cu valorile nominale indicate pe cele trei impedanțe și se notează concluziile.

4.2. Pentru determinarea experimentală a parametrilor impedanță se parcurg următoarele etape:

Pentru determinarea parametrilor Z_{11} și Z_{1s} se realizează montajul din figura 6.a, se observă asemănarea între schemele din figura 4 și figura 6;

Se reglează cursorul autotransformatorului pentru tensiune de ieșire minimă (poziția extremă în sens antiorar);

Se selectează domeniile aparatelor la valorile indicate la 3.1.

Se pune întrerupătorul K pe poziția deschis pentru determinarea lui Z_{11} ;

Se cuplează tensiunea de alimentare de 220 V, 50 Hz;

Se reglează lent cursorul autotransformatorului până când voltmetrul indică o tensiune cuprinsă între 70 V și 130 V;

Dacă indicația wattmetrului este negativă, nu s-a respectat modul de conectare al bornelor marcate; se scoate montajul de sub tensiune și se face conectarea corectă;

Se notează indicațiile aparatelor de măsurat în tabelul 2;

Se închide întrerupătorul K pentru determinarea lui Z_{1s} , după care se reiau măsurătorile;

Pentru determinarea parametrilor Z_{22} și Z_{2s} se realizează montajul din figura 7. A se observa asemănarea între schemele din fig. 6 și fig. 7!

Se pune întrerupătorul K pe poziția deschis pentru determinarea lui Z_{22} și se parcurg etapele 4.2.5 – 4.2.9;

Se închide întrerupătorul K pentru determinarea lui Z_{2s} ;

Pentru determinarea parametrului \underline{Z}_{12} se realizează montajul din figura 9. A se observa asemănările între schemele din fig.8 și fig. 9!

Se efectuează calculele corespunzătoare cu relațiile (20), (18), (16), (17), (22), completându-se toate rubricile din tabelul 2;

Se interpretează rezultatele;

5. Tabele de date și rezultate

Tabelul 1.

Impedanța parametru	U [V]	I [A]	P [W]	$\cos\varphi$	$\sin\varphi$	Z [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	C [μF]
\underline{Z}_1									
\underline{Z}_2									
\underline{Z}_3									

Tabelul 2.

Impedanța parametru	U ₁ [V]	I ₁ [A]	U ₂ [V]	I ₂ [A]	P [W]	$\cos\varphi_{jk}$	$\sin\varphi_{jk}$	R _{jk} [Ω]	X _{jk} [Ω]
\underline{Z}_{11}									
\underline{Z}_{1s}									
\underline{Z}_{22}									
\underline{Z}_{2s}									
\underline{Z}_{21}									
\underline{Z}_{12}									

STUDIUL FENOMENULUI DE FEROREZONANȚĂ ÎN CIRCUITUL SERIE L, C

1. Chestiuni teoretice

În circuitele care conțin bobine cu fier și condensatoare apar fenomene specifice, datorită caracteristicii neliniare a bobinei. Prin caracteristică a bobinei (spre deosebire de curba de magnetizare) se înțelege dependența neliniară între valoarea efectivă a tensiunii la bornele bobinei și valoarea efectivă a curentului care trece prin bobină. Caracteristica $U_L = U_L(I)$ se determină experimental cu aparate de măsură obișnuite și este reprezentată grafic ca în fig. 1.

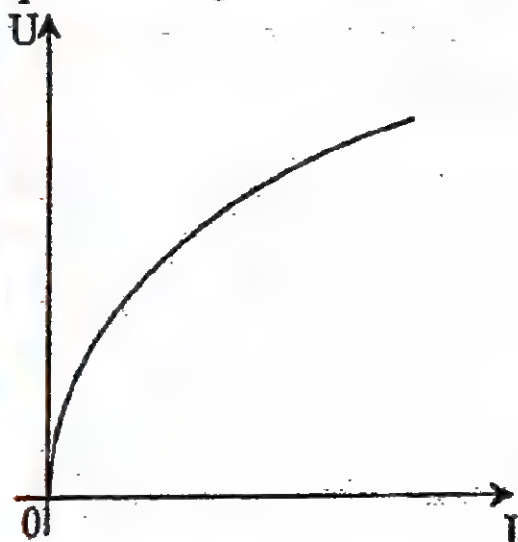


Fig. 1 Caracteristica $U=f(I)$ determinată experimental

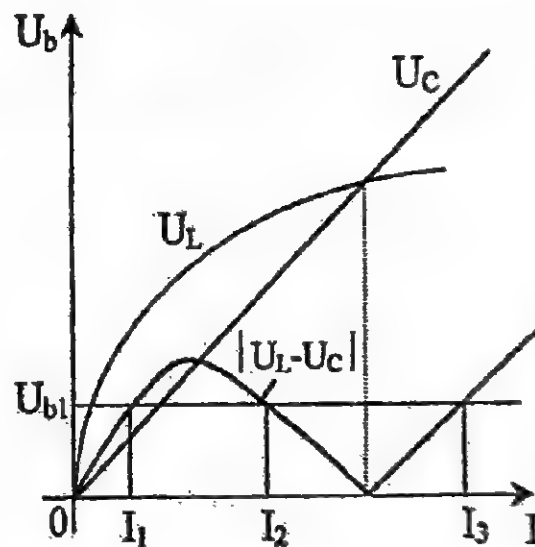


Fig. 2 Caracteristicile $U_L = f(I)$ și $U_C = f(I)$ determinate experimental

Se examinează un circuit format prin conectarea în serie a unui condensator și a unei bobine cu fier alimentat la borne cu tensiune sinusoidală. Pentru analiza calitativă propusă se neglijează pierderile în bobină și condensator, respectiv pierderile în cupru, fier și în dielectric iar în locul curentului ideal se consideră curentul sinusoidal echivalent I_e având

aceeași valoare efectivă și care, datorită absenței pierderilor este în cuadratură cu tensiunea la borne și cu căderile de tensiune echivalente în bobină și condensator. Astfel spus căderile de tensiune echivalente \underline{U}_L și \underline{U}_C sunt în fază sau opoziție de fază cu tensiunea \underline{U} la borne iar între valorile efective există relația:

$$U_b = |U_L - U_C| = \left| U_L(I) - \frac{1}{\omega C} \right|$$

În fig. 2 sunt date caracteristicile $U_L(I)$ neliniară $U_C(I) = \frac{1}{\omega C}$ (liniară).

Executând grafic scăderea $U_L - U_C$ pentru aceleași valori ale curentului se obține caracteristica rezultantă $U_b = U_b(I)$ sub forma formei groase din fig. 2. Curba reală, datorită atât pierderilor în cupru și fier cât și armonicilor superioare ale curentului are o formă asemănătoare celei din fig. 3.

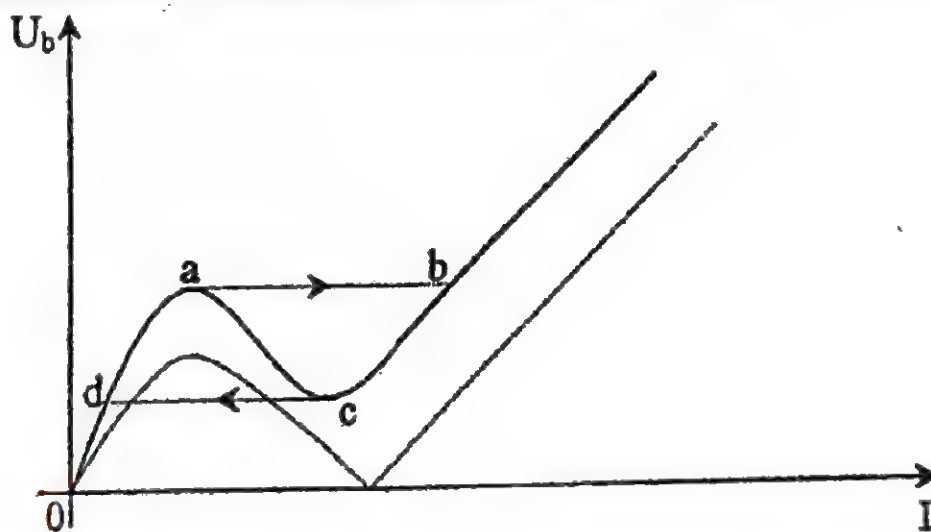


Fig. 3 Curbele reale ale pierderilor în fier și cupru și a armonicilor de ordin superior

Fenomenul este utilizat pentru construirea stabilizatoarelor *ferorezonante de tensiune* (fig.4).

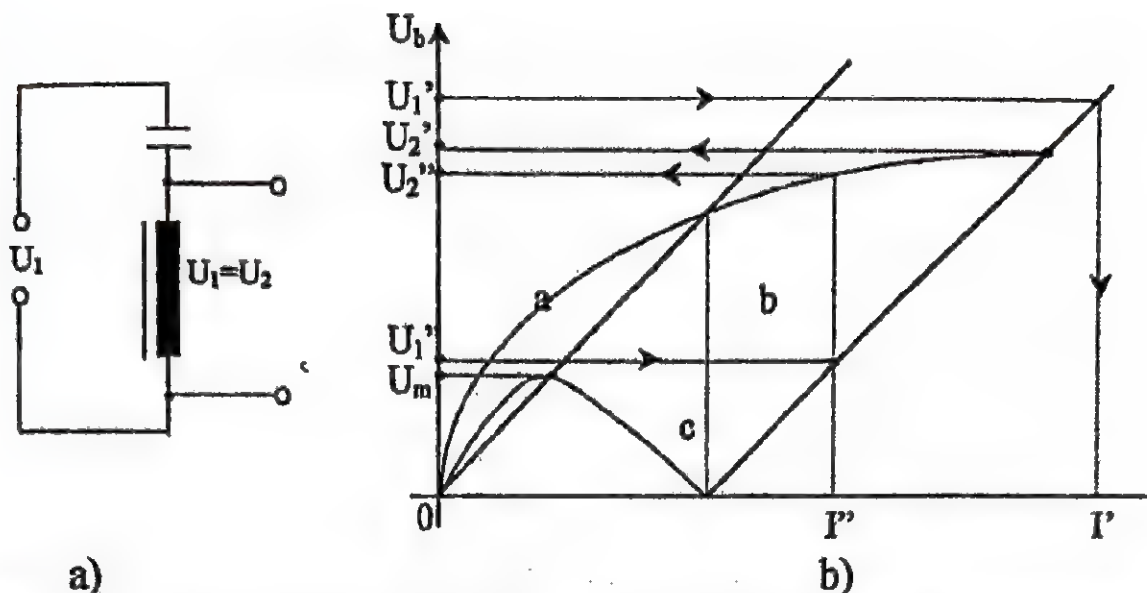


Fig. 4 a) Schema de principiu a unui stabilizator de tensiune ferorezonant

Fig. 4 b) Curbele de variație $U=f(I)$

Se observă că la variații mari ale tensiunii U_1 la borne corespund variații mici ale tensiunii la bobina aflată în regim de saturație. Această saturație a bobinei se produce chiar la valori relativ mici ale tensiunii la borne, când $U > U_m$, tocmai datorită fenomenului de rezonanță a tensiunilor.

2. Chestiuni de studiat

- Ridicarea caracteristicii tensiune – curent a bobinei cu miez de fier și predeterminarea grafică a caracteristicii $U_b=f(I)$ a conexiunii serie bobină – condensator prin neglijarea pierderilor;
- Determinarea experimentală a caracteristicii $U_b=f(I)$ pentru conexiunea serie L, C, prin variația tensiunii aplicate la borne;
- Determinarea experimentală a caracteristicii $U_b=f(I)$ pentru conexiunea L, C, prin variația curentului care trece prin circuit.
- Determinarea experimentală a proprietăților de stabilizare a tensiunii pentru circuitul L, C.

3. Scheme experimentale și aparate de măsură utilizate

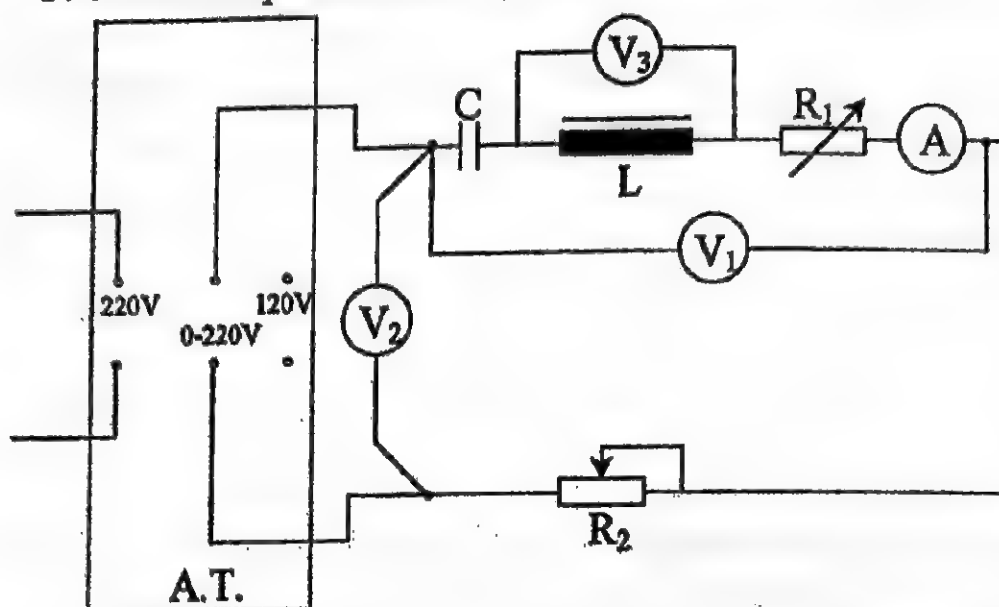


Fig. 5 Schema de lucru a unui circuit ferorezonant

- A.T. - autotransformator reglabil;
 R_1 - rezistență 30Ω ;
 R_2 - reostat $2 \times 1250\Omega$;
A - ampermetru (MAVO 35 sau UNITRA)
 V_1, V_2, V_3 - voltmetre (MAVO 35 sau UNITRA);
L - bobină cu miez d fier realizată din modificarea unui transformator 120/6V;
C - condensator de $3\mu F$.

4. Modul de lucru

a) Se realizează montajul din fig. 5.

La reostatul R_2 se utilizează ambele suluri înseriate astfel încât legătura cu restul schemei se execută la cele două borne de la capătul opus cursorului iar înserierea și reglarea se face prin cursor. Se șuntează condensatorul C printr-un fir cu două borne.

În această primă parte a lucrării reostatul R_2 este scos din circuit (șuntat) iar tensiunea se reglează foarte lin cu ajutorul autotransformatorului A.T. Se determină punctele caracteristicii și se trec în tabelul 1.

b) Se introduce condensatorul C în circuit (prin scoaterea șuntului), rezistența R_2 rămânând scoasă din circuit (șuntat). Se

ridică cu mare atenție curba corespunzătoare descreșterii line și monotone a tensiunii notându-se exact valorile curentului și tensiunii în momentul salturilor. Și aceste două rânduri de date se trec în tabelul 1.

c) Se introduce reostatul R_2 complet în circuit (2400Ω) șuntul respectiv fiind înlăturat. În această poziție se reglează tensiunea la bornele autotransformatorului la 70 V după care nu se mai acționează dispozitivul de reglaj al acestuia.

Cu ajutorul cursorului se modifică lin rezistența reostatului R_2 de la 2400Ω la 0Ω notându-se cu atenție punctele corespunzând maximului și minimului tensiunii precum și punctele intermediare între acestea corespunzând părții descendente (nestabile) a caracteristicii. Se trec rezultatele în tabelul 1.

d) Cu schema de la punctul b se stabilește o tensiune la intrarea schemei corespunzând momentului când are loc primul salt de curent (la creștere). Se crește apoi tensiunea indicată de voltmetrul V_1 până la cca. 220V, observând că tensiunea indicată de voltmetrul V_3 variază puțin (cca. 30V față de cca. 150V la voltmetrul anterior).

Se trec în tabel datele și se trasează caracteristica $U_3=f(U_1)$.

5. Tabel de date

Tabel 1

A		b				c		d	
U [V]	I [A]	Ascendent		Descendent		U [V]	I [A]	U_1 [V]	U_2 [V]
		U [V]	I [A]	U [V]	I [A]				

Obs. La toate cele patru puncte ale lucrării se va regla tensiunea sau rezistența în așa fel încât curentul măsurat de ampermetrul A să varieze între 0 și 250 mA.

FILTRE ELECTRICE

1. Chestiuni teoretice

Filtrele sunt circuite electrice care permit transferul de energie de la intrare la ieșire numai când frecvența semnalului se încadrează între frecvențe numite benzi de trecere sau intervale de trecere date de elemente de circuit. Orice filtru este caracterizat de o mărime de intrare $U_i(t)$ și o mărime de ieșire $U_e(t)$ determinată de elementele de circuit. În regim sinusoidal, raportul complex al tensiunilor de intrare ieșire numit și raport de transmisie:

$$U_i(j\omega)/U_e(j\omega)=A(j\omega)=A(j\omega)e^{jBD} \quad (1)$$

modulul raportului de transmisie se numește raport de atenuare:

$$A(\omega)=|A(j\omega)|=|U_i(j\omega)/U_e(j\omega)| \quad (2)$$

$$\Rightarrow a(\omega)=\ln A(\omega)=\ln U_i/\ln U_e \quad (3)$$

numită atenuare și măsurată în NEPERI

Banda de trecere a oricărui filtru este determinată de două frecvențe de tăiere: f_i – superioară și f_k – inferioară. Caracteristica filtrului se obține reprezentând atenuarea în funcție de frecvență. Dacă $f_i=0$ și f_k – finită și diferită de zero, filtrul este trece jos.

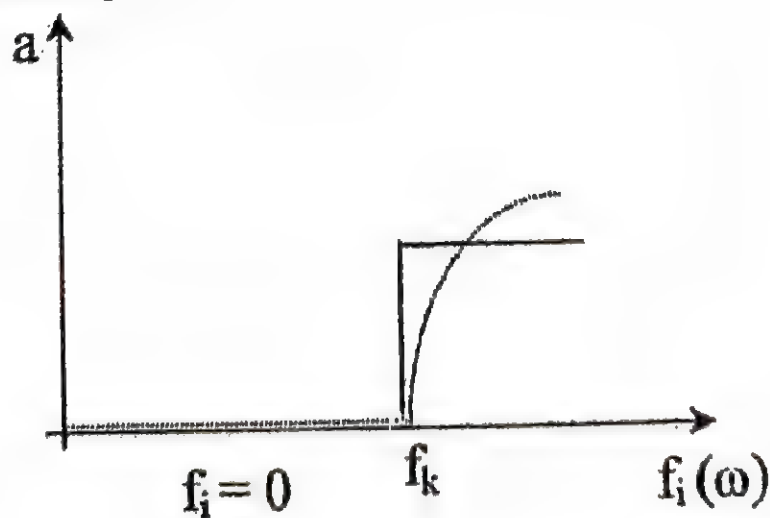


Fig. 1

În fig. 1 se prezintă caracteristica ideală a unui filtru trece jos, iar punctat caracteristica reală.
Dacă f_k este infinită și f_i diferită de zero, filtrul este trece sus.

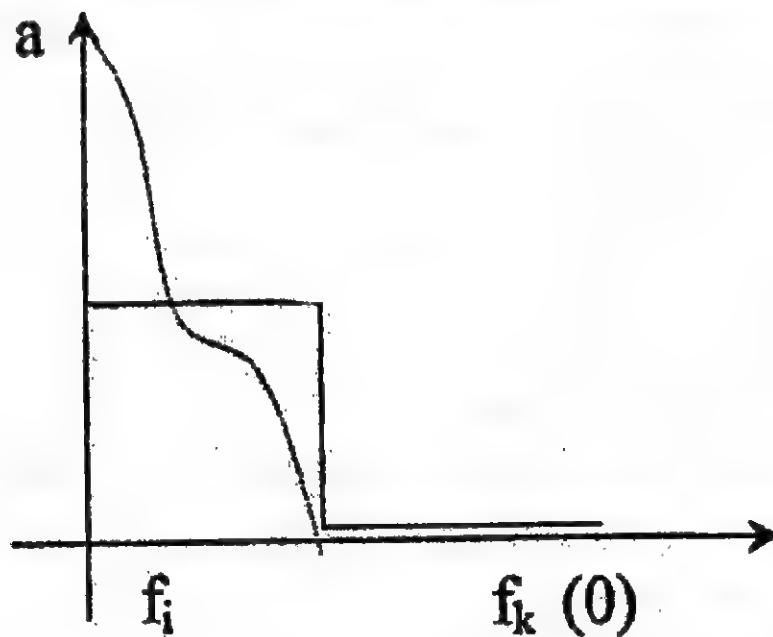


Fig. 2

În fig. 2 se prezintă caracteristica unui filtru trece sus
Dacă ambele filtre sunt finite și nenule, iar $f_g > f_i$, filtrul este trece banda.

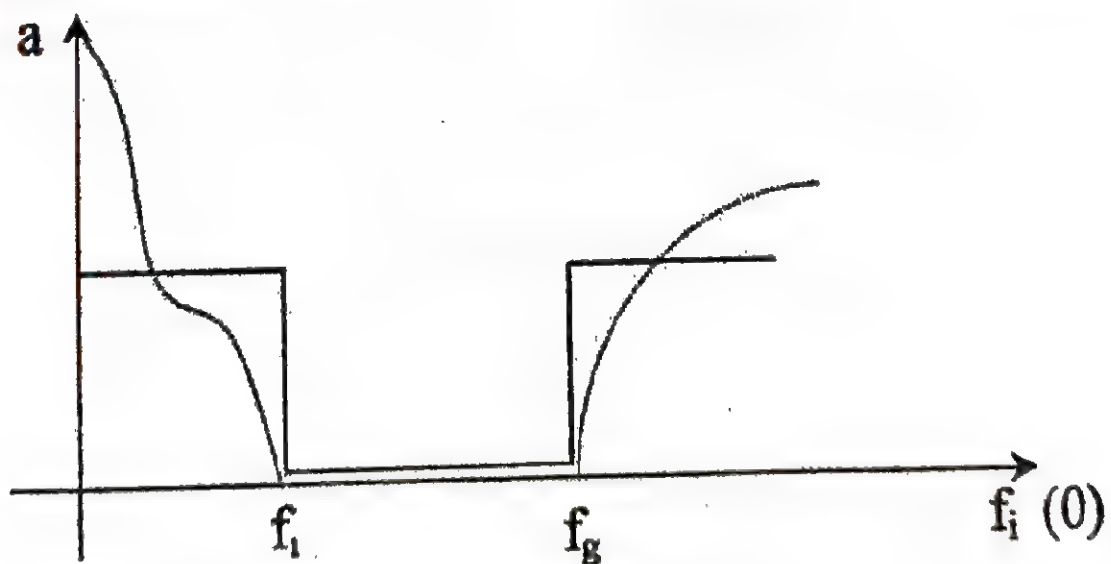


Fig. 3

În fig. 3 se prezintă caracteristica filtru trece banda

FILTRE TRECE JOS

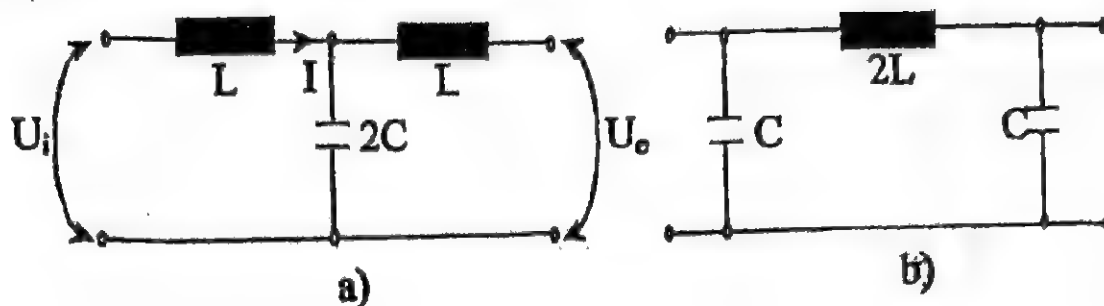


Fig. 4

Pentru filtrul din fig. 4 a.

$$A = U_1/U_2 I_{22=0} = 1 - 2\omega^2 LC \quad (4)$$

Analizăm variația lui A cu frecvența: pentru $\omega=0$, $A=1$; pentru $\omega=\sqrt{2/LCA}=0$; pentru $\omega=1/LCA=-1$; pentru $A \rightarrow -\infty$

Pentru filtrul din fig. 4 b.

$$A = U_1/U_2 I_{22} = 1 - 2\omega^2 LC \quad (5)$$

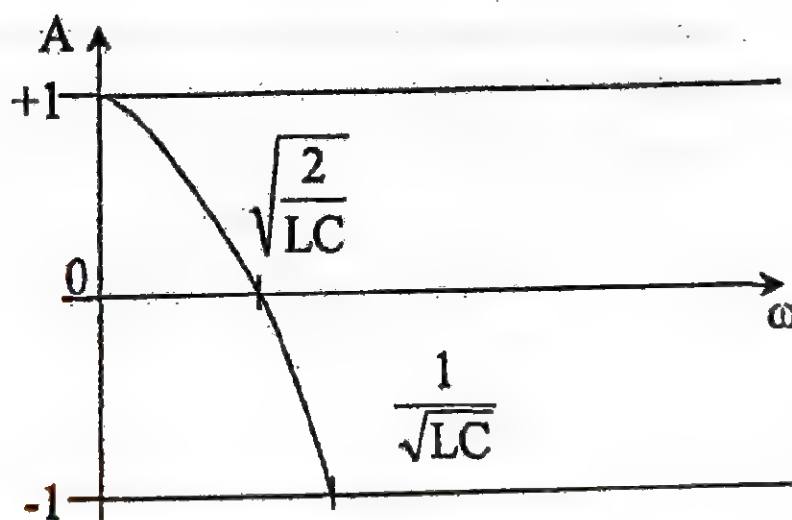


Fig. 5

Variația lui A cu frecvența se prezintă în fig. 5

Zona de frecvență pentru care $-1 < A < +1$ corespunde benzii de trecere. Folosim o metodă de calcul a frecvențelor de tăiere măsurând tensiunile la mersul în gol al filtrului.

La mers în gol

$$U_1/U_2 A = 1 - 2\omega^2 LC \quad (6)$$

Dacă U_1 constant avem $U_2 = U_1 / (1 - 2\omega^2 LC)$. Numitorul este un număr real, deci U_1 va fi în faza sau antifază cu U_2 ; pentru $\omega = 2/LCU_2$ își schimbă faza cu 180° față de U_1 .

FILTRE TRECE SUS

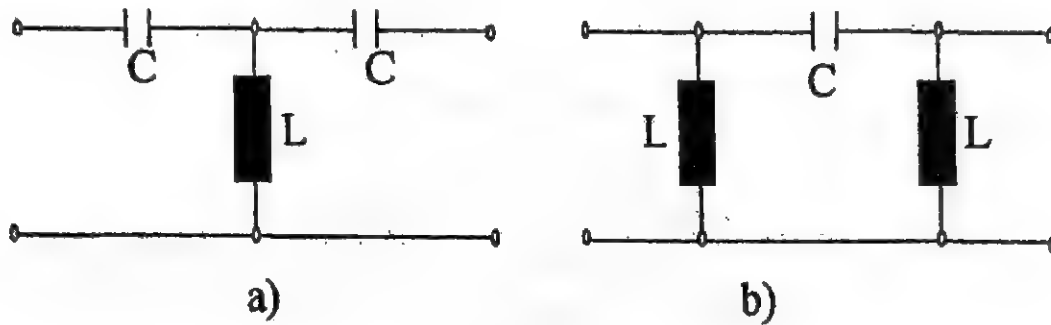


Fig. 6

În fig. 6 se prezintă două tipuri de filtre trece sus

Parametru $A = 1 - 1/2\omega^2 LC$, tensiunea de ieșire este defazată cu π în urma tensiunii de intrare.

2. Chestiuni de studiat

Determinarea frecvențelor de tăiere pentru tensiuni

- Filtre trece sus, schema în π și în T
- Filtre trece jos, schema în π și în T

3. Scheme experimentale și aparate de măsură utilizate

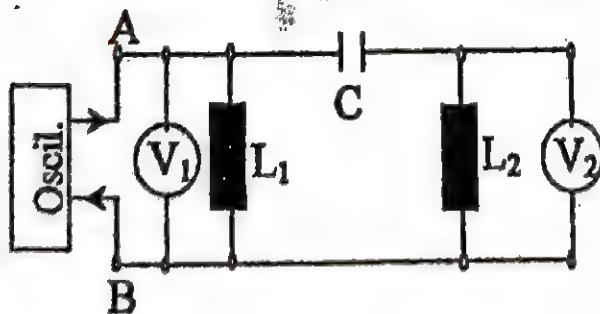


Fig. 7

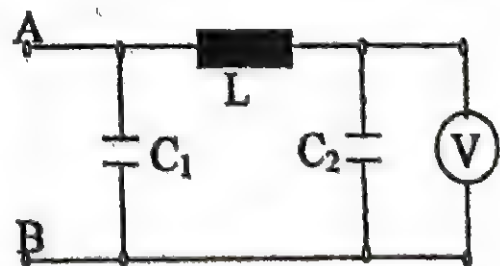


Fig. 8

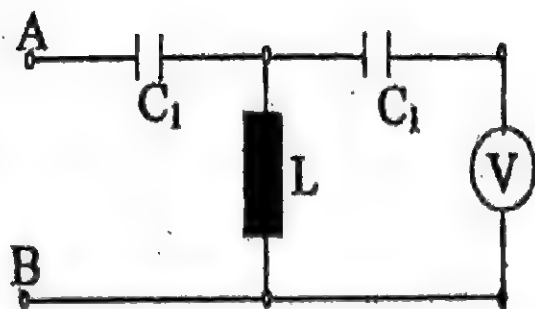


Fig. 9

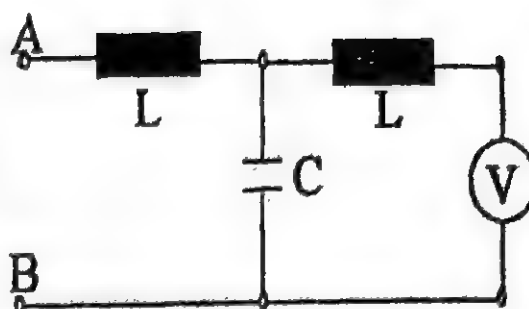


Fig. 10

- | | |
|--------|--|
| L1, L2 | - bobine pe placă |
| C1, C2 | - condensatori de 1 – 10nF |
| V1, V2 | - voltmetre electronice |
| RC | - oscilator sinusoidal cu frecvențe între 20Hz – 20kHz |

4. Modul de lucru

Se realizează un filtru trece sus ca în figura 7 și se alimentează cu oscilatorul. Cu ajutorul a două voltmetre se măsoară tensiunile la intrare și la ieșire. Se modifică frecvența de lucru de la 20Hz la 20kHz, la o tensiune de 3V la intrare. Tensiunea la ieșire va fi, pentru filtrul trece sus, nulă pentru frecvențe joase, crește apoi și devine la un moment dat egală cu tensiunea de intrare. Se observă că cele două tensiuni sunt în opoziție de fază. Se crește frecvența până se ajunge la valoarea maximă a tensiunii de ieșire. Se notează frecvența și ea corespunde pulsației pentru care $A(\omega)$ intersectează axa absciselor.

Se repetă montajul pentru figurile 8, 9, 10, reținând în fiecare caz tensiunile de intrare și frecvențele de tăiere. Parametrul A se determină prin raportul celor două tensiuni, iar semnul pe baza oscilografierii tensiunilor. Caracteristica lui A se reprezintă pe o zonă care să cuprindă punctele în care $U_i = U_e$ și în care devine maximă.

5. Tabel de date și rezultate

Nr. Crt.	F [Hz]	U1 [V]	U2 [V]	$A = \frac{U_1}{U_2}$	semn A
1.					
2.					
3.					

Lucrarea nr. 17

STUDIUL CIRCUITELOR NELINIARE DE CURENT ALTERNATIV REALIZATE CU BOBINĂ CI MIEZ DE FIER

- Chestiuni teoretice

Principalele elemente neliniare ale circuitelor de frecvență industrială sunt bobinele cu miez feromagnetic, respectiv înfășurările circuitelor magnetice ale transformatoarelor și mașinilor electrice. În aceste bobine, în afară de efectele deformante, determinate de neliniarități, au loc și pierderi de putere suplimentare, localizate în miezul feromagnetului și numite pierderi în fier.

Dacă înfășurarea unei bobine cu miez toroidal se conectează la o tensiune sinusoidală:

$$u = U_m \sin \omega t \quad (1)$$

atunci, în cazul în care spirele sale sunt uniform distribuite pe suprafața miezului, se poate admite că fluxul de dispersie este practic nul și deci este valabilă ecuația:

$$u = Ri + \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

Deoarece $\Phi = Li$, putem scrie:

$$u = Ri + \frac{d(Li)}{dt} \quad (3)$$

unde s-a ținut cont că, în cazul circuitelor neliniare, L nu este constant și depinde de valoarea curentului care străbate bobina.

Bobina cu miez toroidal, variația lui Φ și a lui L în funcție de curentul i , se pot vedea în figura 1.

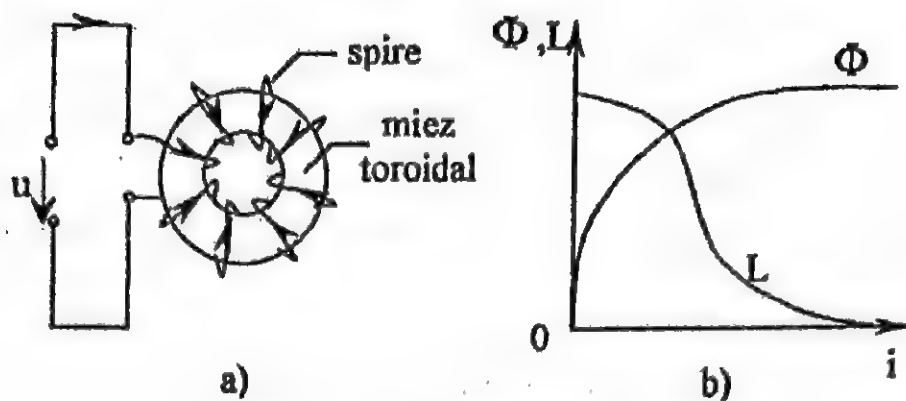


Fig. 1

Dacă putem considera rezistența bobinei, R , foarte mică, atunci relația (2) poate fi scrisă:

$$u = \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

de unde: $\Phi = \int U dt = \int U_m \sin \omega t = -\frac{U_m}{\omega} \cos \omega t$.

Dacă notăm: $\Phi_m = \frac{U_m}{\omega}$ și scriem: $-\cos \omega t = \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$, atunci rezultă:

$$\Phi = \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

Se vede că, în limitele aproximațiilor făcute, fluxul magnetic produs de o tensiune sinusoidală este tot sinusoidal.

Problema centrală a studiului bobinelor cu miez de fier este rezolvarea sistemului de ecuații de mai jos:

$$\begin{cases} u = Ri + \frac{d\Phi}{dt} \\ \Phi = \Phi(i) \end{cases} \quad (6)$$

în care a doua ecuație reprezintă caracteristica flux-curent a bobinei. Această caracteristică este neliniară, de unde rezultă că intensitatea curentului absorbit de bobina cu miez de fier are o variație nesinusoidală în timp, chiar dacă tensiunea aplicată la borne este sinusoidală.

Dacă, pentru simplificare, neglijăm fenomenul de hysterezis, se poate obține expresia analitică a curentului dacă se aproximează caracteristica de magnetizare cu o curbă de forma:

$$i = a\Phi + b\Phi^5 \quad (7)$$

care coincide foarte bine cu forma curbei de magnetizare (figura 2).

Constantele a și b se determină punând condiția ca în punctele A și B de pe caracteristica de magnetizare să fie verificată expresia analitică a curentului. Punctul A se alege înainte de cotul buclei, iar B după el, cât mai aproape de inducția maximă la care se lucrează.

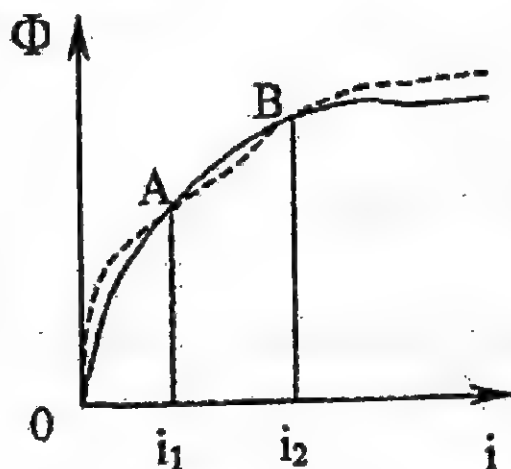


Fig. 2

Putem scrie deci:

$$i_1 = a\Phi_1 + b\Phi_1^5 \text{ și } i_2 = a\Phi_2 + b\Phi_2^5.$$

Din acest sistem rezultă:

$$a = \frac{i_1\Phi_2^5 - i_2\Phi_1^5}{\Phi_1\Phi_2(\Phi_2^4 - \Phi_1^4)} \text{ și } b = \frac{i_2\Phi_1 - i_1\Phi_2}{\Phi_1\Phi_2(\Phi_2^4 - \Phi_1^4)}$$

Expresia analitică a curentului este:

$$i = a\Phi_m \sin\omega t + b\Phi_m^5 \sin^5\omega t$$

$$\text{Dar: } \sin^5\omega t = \frac{1}{16}(10\sin\omega t - 5\sin 3\omega t + \sin 5\omega t) \quad (8)$$

Înlocuind expresia de mai sus în (8) rezultă:

$$i = \left(a\Phi_m + \frac{5}{8}b\Phi_m^5 \right) \sin\omega t - \frac{5}{16}b\Phi_m^5 \sin 3\omega t + \frac{1}{16}b\Phi_m^5 \sin 5\omega t \quad (9)$$

Notăm:

$$I_{m1} = a\Phi_m + \frac{5}{8}b\Phi_m^5;$$

$$I_{m3} = \frac{5}{16}b\Phi_m^5;$$

$$I_{m5} = \frac{1}{16}b\Phi_m^5$$

Cu notațiile de mai sus, (9) devine:

$$I_{m1} \sin\omega t - I_{m3} \sin 3\omega t + I_{m5} \sin 5\omega t \quad (10)$$

curba curentului conține trei armonici impare, reprezentate grafic în figura 3.

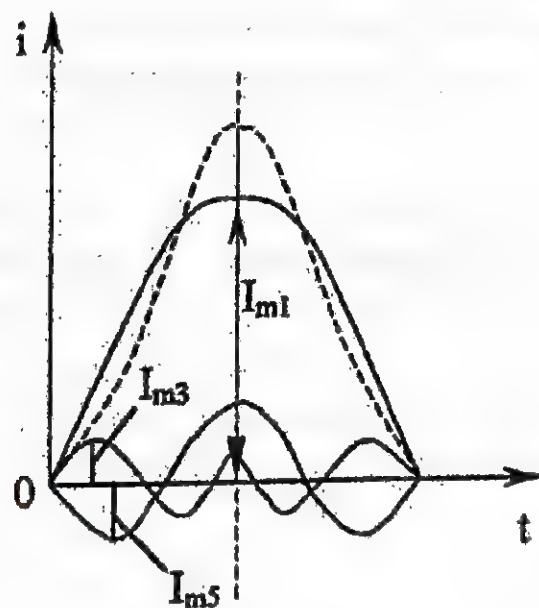


Fig. 3

Valoarea maximă a curentului este:

$$I_m = I_{m1} + I_{m3} + I_{m5} \quad (11)$$

Valoarea efectivă a curentului este:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2} \quad (12)$$

Valoarea medie se calculează astfel:

$$I_{med} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{\pi}{2}} i dt = \frac{1}{\pi} \left(2I_{m_1} + \frac{2}{3}I_{m_3} + \frac{2}{5}I_{m_5} \right) \quad (13)$$

Cu aceste mărimi se pot calcula parametrii ce caracterizează curba nesinusoidală:

$$\text{- factorul de formă: } k_f = \frac{I}{I_{med}} \quad (14)$$

$$\text{- factorul de vârf: } k_v = \frac{I_{max}}{I} \quad (15)$$

$$\text{- factorul de distorsiune: } k_d = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_5^2}}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_5^2}} \quad (16)$$

Din relația (9) se observă că pentru a putea determina expresia analitică a curentului la o bobină cu miez de fier conectată la o tensiune sinusoidală dată, este necesar să se ridice experimental caracteristica de magnetizare a bobinei:

$$\Phi_m = f(I_m) \quad (17)$$

Amplitudinea fluxului magnetic se poate determina folosind o înfășurare suplimentară cu N_2 spire dispusă pe același miez cu bobina dată. La bornele acestei înfășurări suplimentare se leagă un instrument de măsură magnetoelectric cu dispozitiv de redresare. Deviația echipajului mobil a unui astfel de instrument este proporțională cu valoarea medie a tensiunii. Deoarece scala instrumentului pentru regim sinusoidal este etalonată cu valori efective, pentru obținerea valorii medii a tensiunii se împarte indicația aparatului de măsură cu factorul de formă sinusoidală $k_f = 1,1$.

Presupunem o variație sinusoidală a tensiunii de alimentare și a fluxului bobinei (fig. 4).

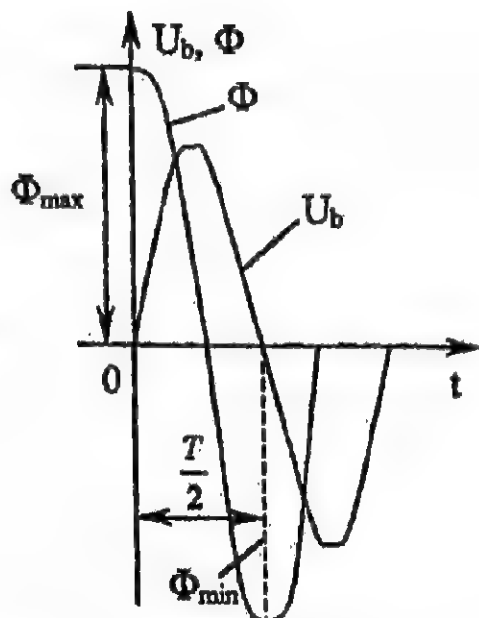


Fig. 4

Plecând de la definiția valorii medii a unei mărimi sinusoidale, obținem în cazul tensiunii u_b :

$$u_{bmed} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{\pi}{2}} u_b dt = 2f \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(-N_2 \frac{d\Phi}{dt} \right) dt = 2fN_2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\Phi = 2fN_2 (\Phi_{max} - \Phi_{min}).$$

Unde Φ_{max} și Φ_{min} au semnificația din figura 4. Din această figură se observă că $\Phi_{max} = -\Phi_{min}$.

Putem scrie deci: $U_{bmed} = 4\Phi_{max} fN_2$

$$\text{De aici: } \Phi_{max} = \frac{U_{med}}{4fN_2} \quad (18)$$

Fie u_v indicația voltmetrului conectat la bornele bobinei cu miez de fier. Conform unor considerații anterioare: $U_{bmed} = \frac{U_v}{1,1}$, și deci

$$\Phi_{max} = \frac{U_v}{4,4fN_2} \quad (19)$$

Pentru măsurarea valorii maxime a curentului I_m este necesar un montaj special întrucât nu există ampermetre speciale la care deviația acului să fie proporțională cu amplitudinea

curentului. În serie cu circuitul în care trebuie măsurat I_m se leagă și o bobină cu miez magnetic liniar peste care se mai dispune încă o înfășurare la care se conectează un voltmetru magnetoelectric cu redresor (figura 5).

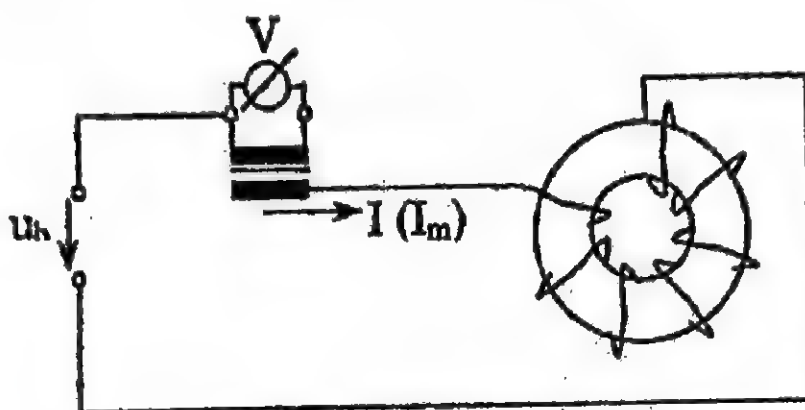


Fig. 5

Notăm:

- Φ'_m - fluxul maxim al bobinei auxiliare;
- R_m - reluctanța circuitului magnetic al acestei bobine;
- N' - numărul de spire al înfășurării auxiliare.

Se poate scrie: $\Phi'_m R_m = I_m N'$ și deci $\Phi'_m = \frac{I_m N'}{R_m}$

Reluctanța circuitului magnetic fiind constantă rezultă:

$$\Phi'_m = C I_m \quad (20)$$

Deoarece indicația voltmetrului este proporțională cu Φ'_m rezultă că este proporțională și cu I_m :

$$I_m = k U' \quad (21)$$

Constanta k se poate determina experimental conectând bobina într-un circuit în care curentul este sinusoidal. Cu un ampermetru se măsoară valoarea efectivă a curentului I și apoi $I_m = \sqrt{2} I$.

Din raportul $\frac{I_m}{U'}$ unde U' este măsurat cu un voltmetru rezultă k .

2. Chestiuni de studiat

- Ridicarea curbei $\Phi_m = f(I_m)$.
- Calculul lui: I , I_m , I_{med} , k_f , k_v , k_d .
- Verificarea experimentală a valorilor calculate la punctul b.
- Oscilografiera curbei curentului.

3. Scheme experimentale și aparate de măsură utilizate

Schemele de montaj necesare sunt prezentate în fig. 6 (a) și

(b).

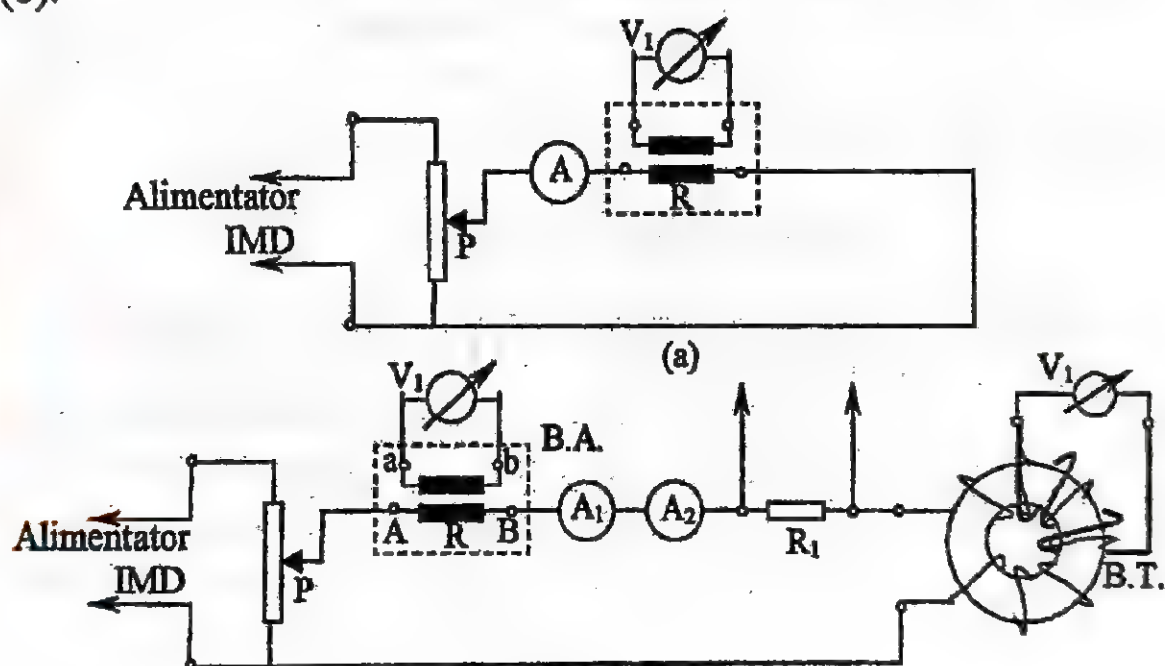


Fig. 6

P	- potențiomtru;
V ₁	- voltmetru tip MAVO 35 (UNITRA);
V ₂	- voltmetru tip MAVO 35 (UNITRA);
BA	- bobine auxiliare;
BT	- bobină toroidală;
R ₁	- reostat 200Ω, 0,65A;
N ₂	- înfășurarea 3,4 cu 65 spire.

4. Modul de lucru

a) Se determină constanta k cu montajul din figura 1.a. Aici R este chiar rezistența ohmică a înfășurării înseriate cu ampermetrul. Se alcătuieste tabelul 1.

b) Se ridică curba $\Phi_{\max} = f(I_{\max})$ cu montajul din figura 6 (b), întocmindu-se tabelul 2.

c) Se calculează I , I_m , I_{med} , k_f , k_d .

d) Se verifică experimental I_{med} și I . Pentru a măsura pe I se conectează un ampermetru electromagnetic, iar pentru a determina pe I_{med} unul electromagnetic cu redresor.

e) Se oscilografiază curba curentului conectând la intrarea unui oscilograf o tensiune luată de la bornele unui rezistor legat în serie cu bobina toroidală din figura 6 (b).

- Tabele de date și rezultate

Tabelul 1.

Nr. Crt.	I [A]	I_m [A]	U' [V]	k	Observații
1.					
2.					
3.					

Tabelul 2.

Nr Crt	N_2	f [Hz]	U_i [V]	$U_{bmed} = \frac{U_2}{1,1}$ [V]	$I_m = kU_i$ [A]	$I_{med} = \frac{I_{\Delta 1}}{1,1}$ [A]	Φ_{\max} [Wb]	I [A]	$k_f = \frac{I_m}{I}$	$k_v = \frac{I_m}{I}$	$k_d = \sqrt{\frac{I_f^2}{I_0^2}}$
1.											
2.											
3.											

Observații:

- În tabelul 2 calculul lui k_d presupune calculul lui I_1 . Aceasta se face ca mai jos:

$$I_1 = \frac{I_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{a\Phi_m + \frac{5b}{8}\Phi_m^5}{\sqrt{2}}$$

Constantele a și b se determină conform indicațiilor din breviarul teoretic al lucrării.

- De la $I=0,4A$ se introduce R_1 prin cursor având valoarea

$$r=0,1R_{max}$$

Bibliografie

1. Țîrcă, A. Bazele electrotehnicii. Îndrumar de laborator. Reprografia Universității „Constantin Brâncuși”, Târgu Jiu, 1993
2. Țîrcă, A., ș.a. Electrotehnică și mașini electrice. Lucrări de laborator. Editura „AGER”, Târgu Jiu, 1998
3. Cozma, V., Popescu, C. Transfoirmatorul electric – teorie și aplicații, Editura SITECH, Craiova, 2005, ISBN 973-657-882-8
4. Cozma, V., Popescu, C. Mașini electrice, Editura SITECH, Craiova, 2005, ISBN 973-657-938-7
5. Cozma, V. ș.a. Electrotehnică și mașini electrice, Ed. Academica Brâncuși, Târgu Jiu, 2002
6. Nicola, D., ș.a. Electrotehnică și mașini electrice. Lucrări de laborator. Reprografia Universității din Craiova, 1995.
7. Moraru, A., ș.a. Electrotehnică, măsurări și mașini electrice. Îndrumar de laborator. Reprografia institutului Politehnic București, 1981.
8. Pușcașu, S., ș.a. Bazele electrotehnicii. Lucrări de laborator. Reprografia Universității din Craiova, 1972.
9. Amuzescu, A., s.a. Îndrumar de electrotehnică. Laborator. Seminar. Editura Psitech, București, 2000.
10. Ambrosie, C., ș.a. Măsurări electrice și traductoare. Îndrumar de laborator.

11. Timotin, A, ș.a. Reprografia Universității din Craiova, 1979.
Lecții de bazele electrotehnicii. Editura didactică și pedagogică, București, 1970.
12. Mocanu, I. C. Teoria circuitelor electrice. Editura didactică și pedagogică, București, 1979.
13. Antoniu, S. I. Bazele electrotehnicii, vol. I și II, Editura didactică și pedagogică, București, 1974.
14. Țîrcă, A. Electrotehnică, măsurări și mașini electrice. Reprografia Universității „Constantin Brâncuși”, Târgu Jiu, 1993.
15. Țîrcă, A. Electrotehnică și mașini electrice. Editura „AGER”, Târgu Jiu, 1999.
16. Țîrcă, A., Cozma V. Electrotehnică. Lucrări de laborator. Editura „AGER”, Târgu Jiu, 2001.